

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE MONTPELLIER 2

SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites

Loïc Brancheriau

Chargé de Recherche au CIRAD

Unité Propre de Recherche : Production et valorisation des bois tropicaux et méditerranéens

Dossier de synthèse

Habilitation à diriger des recherches

Spécialité : Mécanique

Formation doctorale : Information Structures Systèmes

22 janvier 2013

JURY :

- | | |
|---------------------------|--|
| – M. Marc DESCHAMPS | Directeur de recherche CNRS (Rapporteur) |
| – M. Jean-Michel LEBAN | Directeur de recherche INRA (Rapporteur) |
| – M. Jean-Michel GENEVAUX | Professeur (Rapporteur) |
| – M. Bernard THIBAUT | Professeur émérite |
| – M. Emmanuel LE CLEZIO | Professeur (Président) |
| – M. Rémy MARCHAL | Professeur |
| – M. Philippe LASAYGUES | Ingénieur de Recherche CNRS |
| – M. Joseph GRIL | Directeur de Recherche CNRS |

A ma femme Sophie,

A mes filles Cécilia et Anaïs

REMERCIEMENTS

*Je remercie très sincèrement Messieurs les Professeurs
Génevaux, Thibaut, Le Clézio et Marchal, ainsi que Messieurs
les Directeurs de Recherche Deschamps, Leban, Gril et
Lasaygues, qui m'ont fait l'honneur de participer à ce jury.*

Table des matières

1. Carrière professionnelle	10
1.1. Déroulement de carrière	10
1.2. Curriculum Vitae.....	12
1.3. Contexte professionnel	21
1.3.1. Un précieux héritage	21
1.3.2. Un présent en perpétuel évolution	22
1.4. Origine et objectif de l'activité de recherche.....	23
1.4.1. Etendue des ressources forestières	23
1.4.2. Principales fonctions des ressources forestières	23
1.4.3. Objectif de recherche	26
1.4.4. Questions de recherche	27
2. Etude bibliographique	28
2.1. Principes du contrôle non destructif.....	28
2.2. Vibrations mécaniques	29
2.2.1. Principes physiques	29
2.2.2. Ondes élastiques dans les milieux infinis	30
2.2.3. Ondes élastiques dans les milieux bornés (ondes modales).....	31
2.2.4. Transformations des ondes lors de la propagation (dispersion, atténuation et réflexion)	33
2.3. Capteurs acoustiques et ultrasonores.....	36
2.3.1. Accéléromètre	36
2.3.2. Microphone	36
2.3.3. Vibromètre laser.....	37
2.3.4. Marteau force.....	37
2.3.5. Pot vibrant	37
2.3.6. Transducteur ultrasonore.....	38

2.3.7. Accélération, vitesse, déplacement	38
2.4. Contrôle acoustique	39
2.5. Contrôle ultrasonore	41
2.6. Imagerie par tomographie en transmission	43
2.6.1. Principe.....	43
2.6.2. Problème direct	43
2.6.3. Problème inverse.....	44
2.7. Application au matériau bois	46
2.7.1. Structure macroscopique	46
2.7.2. Structure microscopique	46
2.7.3. Composition chimique	47
2.7.4. Comportement mécanique	48
2.7.5. Effet de la densité, de l'humidité et de la température sur le comportement mécanique.....	49
2.7.6. Paramètres mesurables en acoustique et ultrason	50
2.7.7. Effet des propriétés physiques.....	56
2.7.8. Effet des altérations biologiques.....	58
2.7.9. Evaluation non-destructive des arbres sur pied.....	61
3. Synthèse des principaux résultats de recherche.....	64
3.1. Chronologie des actions de recherche	64
3.1.1. Caractérisation unidimensionnelle	64
3.1.2. Imagerie bidimensionnelle.....	66
3.2. Caractérisation unidimensionnelle	68
3.2.1. Domaine acoustique.....	68
3.2.1.1. Caractérisation mécanique	68
3.2.1.1.1. Estimation de la contrainte à rupture par spectroscopie acoustique.....	68
3.2.1.1.2. Détermination des propriétés dynamiques par spectroscopie proche infrarouge	70
3.2.1.2. Etude et perception des sons musicaux.....	72

3.2.1.2.1. Qualité acoustique des lames de xylophone.....	72
3.2.1.2.2. Catégorisation des sons de matériaux frappés	75
3.2.2. Domaine ultrasonore	79
3.2.2.1. Criques de compression dans les assemblages collés.....	79
3.2.2.2. Détermination des axes principaux d'anisotropie	82
3.3. Imagerie bidimensionnelle	86
3.3.1. Contrôle acoustique	86
3.3.1.1. Délaminations des assemblages collés	86
3.3.1.2. Délaminations d'un composite de renforcement d'étanchéité.....	89
3.3.2. Tomographie acoustique.....	93
3.3.3. Tomographie ultrasonore.....	98
3.3.3.1. Imagerie non paramétrique en réflexion	98
3.3.3.2. Imagerie paramétrique et radiographie X.....	99
3.3.3.3. Effet de l'écorce et de la présence de cavité en imagerie paramétrique	105
4. Conclusions et perspectives	110
5. Références bibliographiques.....	115

1. Carrière professionnelle

1.1. Déroulement de carrière

Période 1996-1999 : Orientation vers la recherche scientifique

Pour terminer mon cursus d'ingénieur, je suis embauché pendant trois mois dans une scierie au Canada en 1996. En tant qu'ingénieur, je suis chargé d'améliorer la conduite du séchage et le suivi de la teneur en humidité des bois après séchage par le choix d'une métrologie et d'un protocole plus adapté.

Je m'oriente ensuite vers la recherche scientifique et j'obtiens en 1997 mon Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en Sciences du Bois. C'est au cours de ce cursus que j'effectue mon stage au Programme Bois du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) sur le passage analytique de la flexion trois à quatre points.

Pour effectuer mon service national en 1998, je souhaite mettre en cohérence mes obligations avec mes compétences professionnelles. C'est pourquoi, j'opte pour un service en tant que volontaire à l'aide technique en Martinique. Je suis détaché à l'Office National des Forêts (ONF) et chargé de l'interprofession en première transformation du bois. Il s'agit principalement pour moi d'aider les professionnels dans leurs démarches d'investissement, de développement et de formation.

Au cours de mon service, je conserve des relations étroites avec le Programme Bois du CIRAD. Ceci me permet notamment de participer à la construction d'un projet sur la valorisation des essences d'Antilles-Guyane et également de me porter candidat pour une thèse sur l'étude du comportement dynamique des bois.

Période 1999-2001 : Thèse sur l'analyse dynamique des bois de structure

Après mon volontariat à l'aide technique à l'ONF de Martinique, je débute mes travaux de thèse sur l'expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique en 1999. Au cours de cette période, je suis ingénieur chargé d'études au Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA) et détaché au Programme Bois du CIRAD. Ma spécialité est la mécanique du matériau bois ; spécialisation acquise en DEA Sciences du Bois. Mes travaux permettent notamment la finalisation d'un projet ADEME "*Recherche de défauts par signature acoustique dans des profilés reconstitués*" en 2000.

Période 2001-2006 : Finalisation des travaux de thèse en contrat CIRAD

La période allant du mois d'avril 2001 au mois de septembre 2002 est pour moi une période charnière. En avril 2001, je deviens ingénieur – chercheur au CIRAD en sciences des matériaux appliquées au bois et à ses produits dérivés (contrat à durée indéterminée au Département Forêts, Programme Bois). En fin d'année 2001, l'effectif de l'équipe dans laquelle je travaille est de quatre personnes : Henri Baillères (responsable / ingénieur – chercheur, sciences du bois), Loïc Brancheriau (ingénieur – chercheur, mécanique vibratoire), Gilles Calchera (technicien, mesures physiques) et Sébastien Paradis (technicien,

informatique). En septembre 2002, je soutiens ma thèse pour obtenir le grade de docteur en mécanique - acoustique. Au cours de cette période, je prends en charge le domaine d'étude relatif à l'évaluation des performances des bois et des produits bois par des méthodes non destructives.

La convention d'études entre le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA), le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA) du CNRS et le CIRAD-Forêts, signée en 1999, et encadrant notamment mes travaux de thèse, favorise l'émergence d'un réseau de collaboration scientifique dans lequel je m'insère et qui aboutit notamment en 2001 sur le dépôt d'un brevet sous le titre "Dispositif et méthode de détection de défauts dans un produit en bois ou à base de bois à partir de sa signature acoustique".

Période 2006-2011 : Equipe Xylométrie de l'unité Bois Tropicaux

Jusqu'à mai 2006, Henri Baillères est responsable de l'équipe Xylométrie et pendant la période allant de fin 2005 à début 2006, il prépare son expatriation en Australie. A cette période, l'équipe Xylométrie est composée de quatre personnes : Henri Baillères, Sébastien Paradis, Nabila Boutahar (technicienne, mesures physiques) et moi-même. Je prends la responsabilité de l'équipe après l'expatriation d'Henri Baillères en juin 2006. Au cours de l'année 2007, l'équipe Xylométrie se renforce par l'arrivée d'Alfredo Napoli (chercheur en thermochimie) et de Philippe Gallet (technicien en électronique et informatique industrielle). L'équipe travaille également en étroite collaboration avec Gilles Chaix (chercheur généticien de l'UMR Amélioration Génétique et Adaptation des Plantes, AGAP) et Sophie Nourissier (technicienne de l'UMR AGAP).

En 2011, je considère que l'équipe, ou collectif de recherche, compte 8 personnes (4 chercheurs et 4 techniciens) dont les compétences sont très complémentaires. L'union de ces compétences permet à la fois d'envisager notre activité sous l'aspect recherche fondamentale et recherche finalisée en référence aux produits finaux directement consommés (bois d'œuvre, charbon, papier). Je m'efforce, pour autant que possible, [1] d'assurer la cohésion du groupe (animation scientifique, connaissance des travaux de chacun et mise en commun des actions de recherche). La force de l'équipe réside dans la diversité et la complémentarité des compétences. [2] Permettre la liberté d'action. Chaque personne doit développer et gérer ses propres actions de recherche, avec mon aide et appui en cas de demande. [3] Donner les moyens aux personnes d'exercer leur travail (mise à disposition des moyens matériels, renouvellement des équipements et des logiciels, déplacements professionnels). [4] Gérer le laboratoire au quotidien.

1.2. Curriculum Vitae

Nom	Loïc BRANCHERIAU
Date de naissance	04/12/1973
Adresse professionnelle	CIRAD 73 rue Jean-François Breton 34398 Montpellier Cedex 5 France
Tél. / Fax	04 67 61 65 17 / 04 67 61 65 60
Email	loic.brancheriau@cirad.fr
<u>Profession actuelle</u>	
Employeur	CIRAD - Unité de Recherche : Production et Valorisation des Bois Tropicaux et Méditerranéens
Fonction	Chercheur-Ingénieur en charge de la qualification des produits bois par méthodes non invasives (acoustiques et ultrasons)
<u>Formation</u>	2002 : Doctorat en mécanique, option acoustique (Aix Marseille II / Marseille) 1997 : DEA en Sciences du Bois (Université Bordeaux I / Bordeaux) 1996 : Ingénieur des industries du Bois (Ecole Supérieure du Bois / Nantes) 1991 : Baccalauréat Série C (Lycée Empéri / Salon de Provence)
Formation continue	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Statistiques appliquées avec R (2009) ▪ Mathématiques appliquées avec Scilab (2008) ▪ Réseaux de neurones et machines à vecteurs supports (2007) ▪ Modélisation par éléments finis avec Comsol Multiphysics (2006) ▪ Analyses statistiques multivariées (2006) ▪ Statistiques qualitatives (2005) ▪ Analyse de données en chimiométrie et applications avec Matlab (2003) ▪ Programmation professionnelle avec Delphi (2003) ▪ Spectrophotométrie proche infrarouge et chimiométrie (2002) ▪ Résolution d'équations symboliques avec Mathematica (2001) ▪ Analyse vibratoire (2001)

Expériences professionnelles

1998-1999 : Office National des Forêts. Martinique (France)

Volontaire à l'Aide Technique

- Interprofession en 1ère transformation du bois - Expertise- Aide au développement

1999-2001 : Centre Technique du Bois et de l'Ameublement. Bordeaux (France)

Ingénieur Chargé d'Etudes (thèse CTBA / CIRAD / LMA en contrat CIFRE)

- Expertise mécanique des sciages par analyse des vibrations

Depuis 2001 : CIRAD. Montpellier (France)

Chercheur-Ingénieur de l'unité Production et valorisation des bois tropicaux

Responsable d'équipe "Méthodes d'évaluation des matériaux du végétal (Xylométrie)" depuis 2007

Formations dispensées

2005 : Formation intitulée "Classification du bois de structure par la méthode BING". Séminaire de formation. Etablissement/lieu : CIRAD, Maison de la Technologie. TD/TP et cours : 21 h.

2005-2011 : Formation intitulée "Méthodes de caractérisation rapide du matériau bois" à l'ENGREF de Montpellier. Module "Technologie du bois" dispensé par l'Unité de Recherche Bois tropicaux du CIRAD. 2h.

2007 : Séminaire intitulé "Dynamic Analysis for Machine Strength Grading" au CNR - Istituto per la valorizzazione del legno e delle specie arboree IVALSA (Italie). 7h.

2010 : Vacation d'enseignement, Université de Montpellier II. 27h TD en L1.

2010 : Utilisation du logiciel Scilab. Formation interne CIRAD. 7h.

2012 : COST Action FP0802, training School "Acoustic, ultrasonic and AFM characterization of wood mechanical properties". Montpellier. 2h30 cours, 4h30 TP.

Encadrements

Stages

2004 : Jérôme JUSTET, IUP génie mathématique et informatique, stage effectué au CIRAD UPR 40, encadrement : H. Baillères et L. Brancheriau, "Mise à jour d'un logiciel de classement industriel du bois".

2005 : Martin FOURNIER, ENSTIB 1ère année, stage effectué au CIRAD UPR 40, encadrement : L. Brancheriau, "Etude de l'influence de la température sur le module d'élasticité et le frottement interne d'échantillons de bois sans défaut mesuré par analyse modale des vibrations acoustiques".

2005 : Dominique PEYROCHE, Maîtrise de Physique, stage effectué au Laboratoire

de Mécanique et d'Acoustique, CNRS UPR7051, encadrement : R. Kronland, M. Aramaki (LMA) et L. Brancheriau, "Relation entre les caractéristiques mécaniques des bois de lutherie et les sons engendrés par percussion".

2007 : Bertrand ILHE, Master Recherche Mécanique, Physique et Modélisation - Spécialité Acoustique, stage effectué au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, encadrement : P. Lasaygues (LMA) et L. Brancheriau, "Contrôle Non Destructif de défauts dans les ailes d'avions de voltige".

2007 : Romain SOUBDE, Ingénieur ENSAM Cluny 3ème année, stage effectué au CTBA Pôle Construction de Bordeaux, encadrement : R. Marchal (ENSAM Cluny), J.D. Lanvin (CTBA Bordeaux) et L. Brancheriau, "Evaluation de structure en bois par des ondes élastiques : expérimentation d'un nouveau dispositif pour l'inspection in situ".

2008 : Patrick MARMAROLI, Master Recherche Signal et Trajectographie, Université du Sud Toulon Var, stage effectué au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, encadrement : R. Kronland, M. Aramaki (LMA) et L. Brancheriau, "Catégorisation des sons de matériaux frappés : approches perceptive et statistique".

2010 : Clément WERNER, PHELMA/Grenoble INP – stage fin d'étude ingénieur, effectué au Laboratoire du Musée de la musique, encadrants : S. Le Conte et L. Brancheriau, "Modification des propriétés dynamiques de plaques de bois – application aux tables d'harmonie des instruments de musique".

2010 : Pierre JOZWICKI, stage de fin d'étude cycle ingénieur, école CPE Lyon, effectué au CNDRI INSA Lyon, encadrants : Valérie Kaftandjian et Loïc Brancheriau, "Imagerie par rayons X (radioscopie, tomographie) pour l'analyse du bois".

2010 : Loïc BASSECK, école d'ingénieur ENSEA 1ère année, encadrant : L. Brancheriau, "Etude de la faisabilité d'une mesure de retrait dimensionnel par analyse d'image".

2010 : Alexandre DIAZ, BTSI1 (IRIS 1ère année), encadrants : S. Paradis et L. Brancheriau, "Mesure du frottement interne des essences du logiciel Tropix et mise à jour de la base de données bois".

2010 : Ashkan GHODRATI, Stage de Master, Islamic Azad University, science and Research Branch, Tehran- Iran, encadrant : L. Brancheriau, "ultrasonic tomography of *Picea abies*".

2011 : Andrès ARCINIEGAS, Stage de Master II, Ecole Nationale d'Ingénieur du Val de Loire (Blois). Cotutelle CNRS-LMA (Marseille) et CIRAD, encadrants : P. Lasaygues

Thèses

et L. Brancheriau, "Tomographie ultrasonore appliquée à l'imagerie des arbres sur pied".

2004-2007 : Adil DIKRALLAH – Sujet : Détection et caractérisation in situ des défauts du bois par des méthodes non destructives acoustiques et mécaniques. Projet PAI France – Maroc et bourse de séjour CIRAD DESI. Université Mohamed V, Faculté des Sciences Rabat. Directeur de thèse : Pr. Abdelillah HAKAM.

2008-2010 : Mohammadali SAADATNIA – Sujet : An investigation of the acoustical behaviour of reaction wood by ultrasonic technique (case study: Poplar, Spruce). University of Teheran (Iran) Faculty of natural resources. Directeur de thèse: Ali A. Enayati.

2009-2011 : Paulo HEIN – Sujet : Déterminisme génétique et environnemental des propriétés physico-chimiques du bois d'Eucalyptus – Conséquences sur la variabilité des propriétés mécano-physiques en fonction de l'usage du bois. Ecole doctorale Information Structures Systèmes (I2S) – Université de Montpellier II. Directeur de thèse : J. Gril. Co-encadrants: G. Chaix et L. Brancheriau.

En cours :

2011 : Andrès ARCINIEGAS – Sujet : Tomographie ultrasonore des bois sur pied. Ecole doctorale Sciences pour l'ingénieur – Université Aix-Marseille II. Directeur de thèse : P. Lasaygues. Co-encadrant : L. Brancheriau.

2011 : Sylvestre Kodjo TONDJO – Sujet : Etude et modélisation des relations structure-fonctions chez le *Tectona grandis* (Teck) en plantation au Togo. Université de Lomé (Togo). Directeurs de thèse : T. Fourcaud et K. Kokou. Co-encadrants : S. Sabatier, D. Kokutse-Kokou et L. Brancheriau.

Publications**Articles**

Brancheriau L., Baillères H. (2002) "Natural vibration analysis of wooden beams : a theoretical review", Wood Science and Technology, Vol. 36, N°4, pp. 347-365.

Brancheriau L., Baillères H., Guitard D. (2002) "Comparison between modulus of elasticity values calculated using 3 and 4 point bending tests on wooden samples", Wood Science and Technology, Vol. 36, N°5, pp. 367-383.

Brancheriau L., Baillères H. (2003) "Use of the Partial Least Squares Method with Acoustic Vibration Spectra as a New Grading Technique for Structural Timber", Holzforschung, Vol. 57, N°6, pp. 644-652.

Brancheriau L., Baillères H., Détéienne P., Kronland R., Metzger B. (2006) "Classifying

xylophone bar materials by perceptual, signal processing and wood anatomy analysis", *Annals of Forest Science*, Vol. 63, N°1, pp. 73–81.

Brancheriau L., Baillères H., Sales C. (2006) " Acoustic resonance of xylophone bars: experimental and analytic approaches of frequency shift phenomenon during the tuning operation of xylophone bars ", *Wood Science and Technology*, Vol. 40, N°2, pp. 94-106.

Brancheriau L. (2006) " Influence of cross section dimensions on the Timoshenko's shear factor – Application to wooden beams in free-free flexural vibration ", *Annals of Forest Science*, Vol. 63, N°3, pp. 319-321.

Brancheriau L., Baillères H., Détienne P., Gril J., Kronland R. (2006) " Key signal and wood anatomy parameters related to the acoustic quality of wood for xylophone-type percussion instruments ", *Journal of Wood Science (Japan Wood Research Society)*, Vol. 52, N°3, pp. 270 - 273.

Aramaki M., Baillères H., Brancheriau L., Kronland R., Ystad S. (2007) " Sound quality assessment of wood for xylophone bars ", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 121, N°4, pp. 2407–2420.

Brancheriau L., Lasaygues P., Debieu E., Lefebvre J.P. (2008) " Ultrasonic tomography of green wood using a non-parametric imaging algorithm with reflected waves ", *Annals of Forest Science*, Vol. 65, N°7, pp. 712-718.

Giordanengo T., Charpentier J.P., Roger J.M., Roussel S., Brancheriau L., Chaix G., Baillères H. (2008) "Correction of moisture effects on near infrared calibration for the analysis of phenol content in eucalyptus wood extracts", *Annals of Forest Science*, Vol. 65, N°8, p.803-810.

Kokutse A.D., Brancheriau L., Chaix G. (2010) "Rapid prediction of shrinkage and fibre saturation point on teak (*Tectona grandis*) wood based on near-infrared spectroscopy", *Annals of Forest Science*, Vol. 67, N°4, p.403-412.

Dikrallah A., Kabouchi B., Hakam A., Brancheriau L., Baillères H., Famiri A., Ziani M. (2010) "Study of acoustic wave propagation through the cross section of green wood", *C. R. Mécanique*, Vol. 338, N°2, p.107-112.

Chaix G., Kokutse A.D., Ratovomboahangy B., Guibal D., Randrianjafy H., Rakotondraoelina H., Brancheriau L., Rakotovololonalimanana H., Hein P., Ramanananantoandro T. (2010) "Prediction of radial and tangential shrinkages by near-infrared spectroscopy: an example for *tectona grandis* from togo and for *liquidambar styraciflua* from Madagascar", *Cerne*, Vol. 16, Suplemento, p. 66-73.

Hein P., Brancheriau L., Lima J.T., Rosado A.M., Gril J., Chaix G. (2010) "Clonal and environmental variation of structural timbers of eucalyptus for growth, density, and dynamic properties", *Cerne*, V. 16, Suplemento, p. 74-81.

Traoré B., Brancheriau L., Perré P., Stevanovic T., Diouf P. (2010) "Acoustic quality of vène wood (*Pterocarpus erinaceus* Poir) for xylophone instruments manufacture in Mali", *Annals of Forest Science*, 67(8): 815-821.

Brancheriau L., Kouchade C., Brémaud I. (2010) "Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods", *Journal of Wood Science*, 56(5):371–379.

Hein P.R.G., Brancheriau L., Trugilho P.F., Lima J.T. and Chaix G. (2010) "Resonance and near infrared spectroscopy for evaluating dynamic wood properties", *J. Near Infrared Spectrosc.*, 18(6): 443-454.

Hein P.R.G., Clair B., Brancheriau L. and Chaix G. (2010) "Predicting microfibril angle in Eucalyptus wood from different wood faces and surface qualities using near infrared spectra", *J. Near Infrared Spectrosc.*, 18(6): 455-464.

Saadat-Nia, M. A., Brancheriau, L., Gallet, P., Enayati, A. A., Pourtahmasi, K., and Honarvar, F. (2011). "Ultrasonic wave parameter changes during propagation through poplar and spruce reaction wood", *BioRes.* 6(2), 1172-1185.

Roohnia, M., Hashemi-dizaji, S.-F., Brancheriau, L., Tajdini, A., Hemmasi, A.-H., and Manouchehri, N. (2011). "Effect of soaking process in water on the acoustical quality of wood for traditional musical instruments", *BioRes.* 6(2), 2055-2065.

Roohnia M., Alavi-Tabar S.E., Hossein M.A., Brancheriau L., and Tajdini A. (2011) "Dynamic modulus of elasticity of drilled wooden beams", *Nondestructive Testing and Evaluation* 26(2): 141-153.

Hein, P. R. G., and Brancheriau, L. (2011). "Radial variation of microfibril angle and wood density and their relationships in 14-year-old Eucalyptus urophylla S. t. Blake wood," *BioRes.* 6(3), 3352-3362.

El Mouridi M., T. Laurent, L. Brancheriau, O. Arnould, A. Famiri, A. Hakam, J. Gril (2011) "Searching for material symmetries in the burr wood of thuja by a direct contact ultrasonic method on spherical samples", *Maderas* 13(3): 285-296.

Baillères, H., Hopewell, G., Boughton, G., and Brancheriau, L. (2012). "Strength and stiffness assessment technologies for improving grading effectiveness of radiata

**Conférences
internationales avec
actes**

pine wood," *BioRes.* 7(1): 1264-1282.

Stokes A., Mine F.X., Mao Z., Brancheriau L. (2012) "Multi-stemming and mechanical traits ensure persistence of subalpine woody plants exposed to a disturbance gradient", *Journal of Vegetation Science*, 23: 325-338.

Hein P., Brancheriau L., Lima J.T., Gril J., Chaix G. (2012) "Resonance of structural timbers indicates the stiffness even of small specimens of *Eucalyptus*", *Wood Science and Technology*, 46: 621-635.

Aramaki M., Brancheriau L., Baillères H., Guillemain P., Kronland R., Lanvin J.D. (2000) " Modeling vibrations response of wooden beams with singularities using sound synthesis model ", Presentation, 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, pp. 113-121.

Brancheriau L., Baillères H., Lanvin J.D. (2002) " A new grading process for structural timber based on partial least squares method using acoustic vibrations spectra ", Poster with full article, 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of California, Berkeley, pp. 265-272.

Dikrallah A., Hakam A., Kabouchi B., Brancheriau L., Baillères H., Famiri A., Ziani M., Gril J. (2006) " Experimental Analysis of Acoustic Anisotropy of Green Wood by using Guided Waves ", ESWM-COST Action E35, Florence, Italy, May 15-17, Pre-Proceedings pp. 149-154.

Aramaki M.; Baillères H.; Brancheriau L.; Kronland-Martinet R.; Ystad S. (2006) " Relationship between sound classification of xylophone-like bars and wood species properties ", CD-ROM Proceedings of the Thirteenth International Congress on Sound and Vibration (ICSV13), July 2-6, 2006, Vienna, Austria, Eds.: Eberhardsteiner, J.; Mang, H.A.; Waubke, H., Publisher: Vienna University of Technology, Austria, ISBN: 3-9501554-5-7.

Lasaygues P., Franceschini E., Debieu E., Brancheriau L. (2007) " Non-destructive diagnosis of the integrity of green wood using ultrasonic computed tomography ", Poster presentation, International Congresses on Ultrasonics, April 9-12, 2007, Vienna, Austria. Session S04: Non-destructive evaluation of anisotropic materials. Full paper available on line.

Aramaki M., Brancheriau L., Kronland R., Ystad S. (2008) " Perception of impacted materials: sound retrieval and synthesis control perspectives ", 5th International Symposium on Computer Music Modeling and Retrieval, CMMR 2008 - Genesis of Meaning in Sound and Music, Copenhagen, Denmark, May 19th-23rd, 2008.

Communication with full article. Published in Springer LNCS vol. 5493, pp. 134-146. ISBN: 978-3-642-02517-4.

Mine F.X., Stokes A., Brancheriau L. (2009), "Multi-stemming and mechanics of trees and shrubs growing along avalanche paths", 6th Plant Biomechanics Conference – Cayenne, France, November 16–21, ISSN 2105-1089, p.456-462.

Brancheriau L., Gallet P., Thaunay P., Lasaygues P. (2009), "Ultrasonic device for the imaging of green wood", 6th Plant Biomechanics Conference – Cayenne, France, November 16–21, ISSN 2105-1089, p.285-288.

Brancheriau L., Gallet P., Thaunay P., Lasaygues P. (2011) "Application of ultrasonic tomography to characterize the mechanical state of standing trees (*Picea abies*)", 10th Anglo-French Physical Acoustics Conference, 19-21 January 2011, Fréjus, France.

Brancheriau L., Saadat-Nia M.A., Gallet P., Lasaygues P., Pourtahmasi K., and Kaftandjian V. (2011) "Ultrasonic imaging of reaction wood in standing trees", 31th International Symposium on Acoustical Imaging (AI31), 10-13 April, 2011, Warsaw, Poland.

Brancheriau L., Gallet P., Lasaygues P. (2011) "Ultrasonic imaging of defects in standing trees - Development of an automatic device for plantations", 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 14-16 September, 2011, Sopron, Hungary.

Livres

Brancheriau L. (2011) "Vibrations de Poutre", Editions Universitaires Européennes, ISBN-13: 978-6131564291, p. 256.

Brancheriau L. (2011) " Corrections for Poisson Effect in Longitudinal Vibrations and Shearing Deformations in Transverse Vibrations Applied to a Prismatic Orthotropic Body" in "Mechanical Vibrations: Types, Testing and Analysis", Amy L. Galloway (Ed.), Nova Science Publishers, ISBN-13: 978-1616682170, pp.205-224.

Propriété Intellectuelle

2003 : Brevet, Kronland R., Baillères H., Guillemain P., Calchera G., Brancheriau L., Lanvin J.D., Grenier D. "Device and method for detecting defects in a wood or wood-based product from its acoustic signature". Geneva : OMPI, 11 p. PCT/FR02/03272, 2002//0/9/.

2007 : Protection des droits de propriété du logiciel "WISIS" version 1.0 (APP).

2008 : Dépôt de la marque commerciale "Wood InSitu InSpection" pour le logiciel

"WISIS" (déclaration faite le 02/05/2008, INPI bulletin n° 08/29 Vol.I du 18/07/2008).

2008 : Renouvellement de la marque commerciale "BING !" (déclaration faite le 26/02/2008, INPI bulletin n° 08/33 Vol.II du 14/08/2008).

2008-2009 : Renouvellement des droits de propriété APP pour la version 9.0 du logiciel "BING" (droits détenus par le CIRAD pour la version BING2000).

Logiciels

<http://www.xylo-metry.org/en/software.html>

- Paradis S., Brancheriau L. BING v9
- Paradis S., Brancheriau L. WISIS - Wood InSitu Inspection
- Paradis S., Guibal D. *et al.* TROPIX v7, programmation du module de recherche par similarité et affichages graphiques par histogramme et courbe de dispersion

Expertises

Maroc, Australie, Luxembourg, Ghana, Togo, Italie, Canada

2002 et 2007 Contrôle non destructif de structures bois (Nantes et Arles)

2009 Expert AERES, évaluation du Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés (LABOMAP) de l'ENSAM Cluny

Congrès

2010 Organisation de la session APU13 : Caractérisation des milieux naturels et en croissance du 10ème Congrès Français d'Acoustique - 12-16 Avril 2010 – Lyon

1.3. Contexte professionnel

1.3.1. Un précieux héritage

Depuis 1997 (DEA en Sciences du Bois), mes travaux de recherche ont toujours été effectués au sein du même laboratoire (Programme Bois du Département Forêts devenu Unité Bois Tropicaux du département PERSYST). L'unité Bois Tropicaux s'inscrit dans le prolongement des recherches en sciences du bois appliquées aux bois tropicaux initiées en France depuis la première guerre mondiale. Il me semble important de présenter un bref historique car il n'est pas rare pour nous de consulter et de travailler sur des données et documents de plus de 50 ans.

Les premières recherches sur les bois tropicaux, engagées pour les besoins d'une économie de guerre, sont à l'origine du CTFT (Centre Technique Forestier Tropical). Les premiers essais physiques et mécaniques sont entrepris, en 1917, au laboratoire d'essais du conservatoire des arts et métiers et, plus tard, à la section technique de l'aéronautique militaire. A la même date est créée la section des bois coloniaux au Ministère de l'Armement. La création d'un institut de recherches forestières tropicales sous la forme d'une société d'Etat est décidé en 1946 afin d'asseoir, sur des bases techniques sérieuses, le développement de la production de nos forêts tropicales. L'institut est enfin créé en 1949 mais sous la dénomination de Centre technique forestier tropical (CTFT), et ses bâtiments ne sont inaugurés qu'en 1954. Le CTFT disparaît en 1984 en tant qu'organisme autonome. (Catinot, 1994).

A l'origine du CIRAD se trouvent les neuf instituts de recherche agricole tropicale dont fait partie le CTFT. En 1958, ils sont rassemblés au sein d'un Comité de liaison des organismes de recherches agricoles spécialisés outre-mer. Puis réunis en 1970 pour former le Groupement d'étude et de recherche pour le développement de l'agronomie tropicale (Gerdat). (Bonneuil et Kleiche, 1993).

La structure dédiée à ces activités a conservé pendant toute cette période une mission et une démarche scientifique axée sur la connaissance des ressources ligneuses tropicales. Au fil du temps, la structure a changé de nom passant du Laboratoire de recherche sur les bois coloniaux au Centre Technique Forestier Tropical tout en gardant les mêmes objectifs et missions (Figure 1).

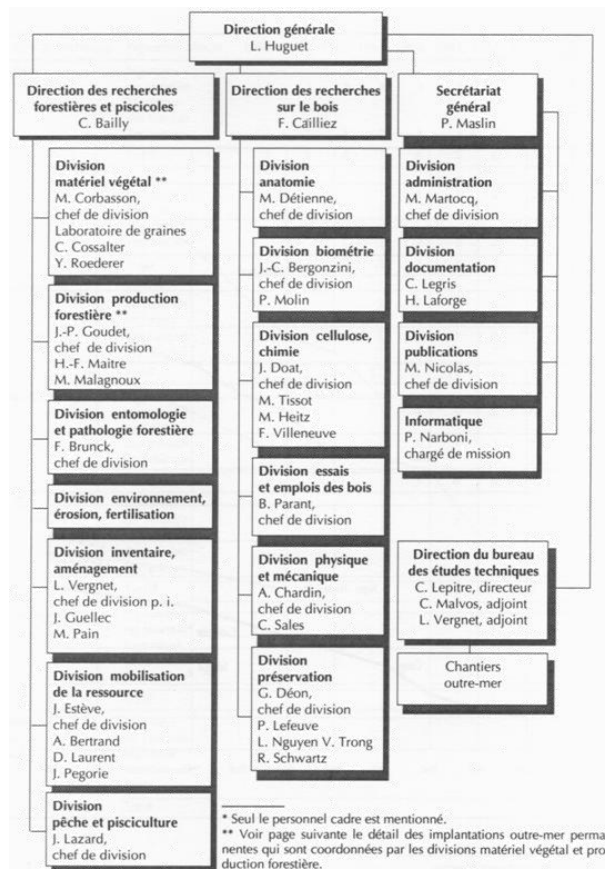


Figure 1 : Organigramme du CTFT en 1983. (Catinot, 1994).

1.3.2. Un présent en perpétuel évolution

Le CIRAD a été créé sous la forme d'un établissement public à caractère industriel et commercial en 1984. Il a lui-même connu des réorganisations continues puisqu'au fil du temps, les neuf départements d'origine se sont mués en trois départements scientifiques ; les unités de recherche en programmes puis de nouveau en unités de recherche ; l'organisation en filière professionnelle (dont forêt-bois) a laissé la place en un arrangement par discipline scientifique.

Ainsi l'intention clairement exprimée actuellement de placer la recherche au cœur de l'activité du CIRAD fait-elle suite à une période d'insistance sur la recherche de contrats. En tant qu'organisme de recherche public pour le développement, le CIRAD étant soumis à trois exigences : conduire une recherche de qualité, aider au développement des pays les plus démunis et assurer une partie de son financement par des contrats. Les personnels, rompus à l'exercice de réorganisations et changements de directives, tentent de conserver une claire perception de l'ensemble des facettes de leur métier.

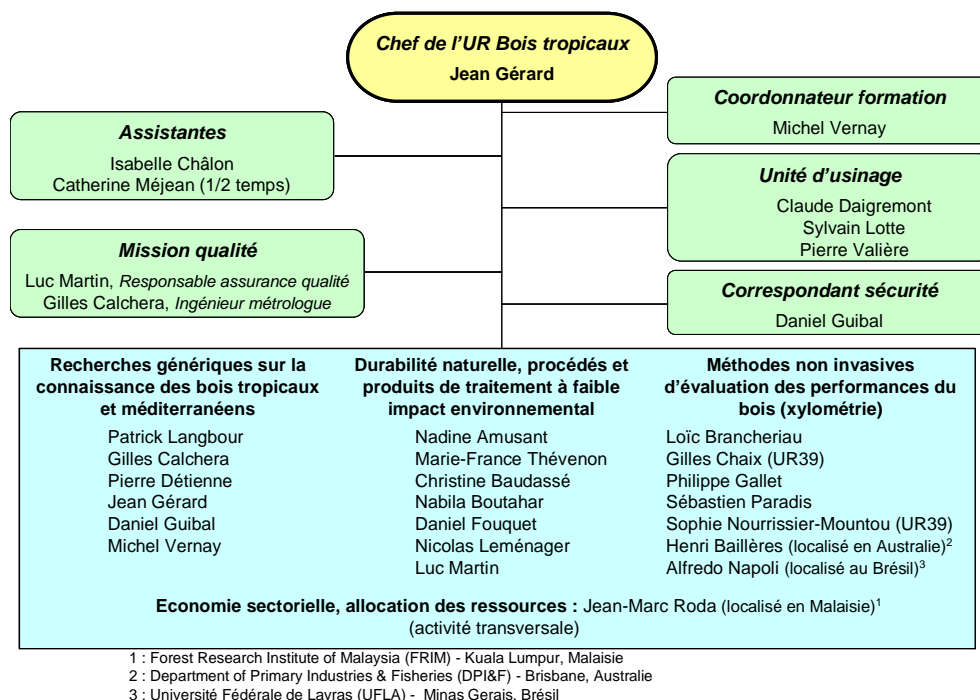


Figure 2 : Organigramme de l'unité Production et valorisation des bois tropicaux (2010).

C'est pourquoi, je présente ici l'organisation de l'unité en 2010 (Figure 2, source : dossier d'évaluation AERES de l'unité, campagne d'évaluation 2011-2014). La vie scientifique de l'unité est organisée autour de quatre thématiques de recherche dont une transversale (Economie sectorielle) : T1- Recherches génériques sur la connaissance des bois tropicaux et méditerranéens ; bases de données, bases de connaissances et collections de référence. T2 - Durabilité naturelle, procédés et produits de traitement à faible impact environnemental, valorisation des substances naturelles. T3 - Méthodes non invasives et/ou rapide d'évaluation des performances du bois (Xylométrie). T4 - Economie sectorielle, allocation des ressources.

Les effectifs permanents sont constitués de 23 agents dont 13 chercheurs et ingénieurs, 3 chercheurs expatriés, 1 chercheur et 1 technicienne accueillis (Unité Génétique forestière - Département Bios). L'unité a pour objet d'étude les bois tropicaux et méditerranéens. La finalité première des travaux conduits par l'unité dans ses différents domaines de compétence : Améliorer les connaissances, les modalités de transformation et de mise en œuvre, la mise en marché et l'utilisation des bois.

1.4. Origine et objectif de l'activité de recherche

1.4.1. Etendue des ressources forestières

Le monde possède un peu moins de 4 milliards d'hectares de forêts, qui couvrent environ 30% de la superficie terrestre totale. Les forêts sont inégalement réparties dans le monde (Figure 3). Cinq pays (la Fédération de Russie, le Brésil, le Canada, les Etats-Unis et la Chine) possèdent ensemble plus de la moitié de la superficie forestière totale de la planète. (FAO, 2007).

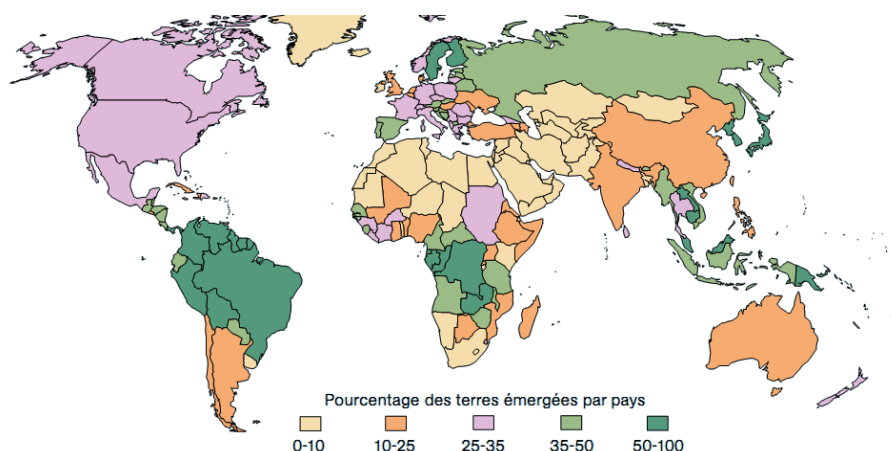


Figure 3 : Superficies forestières en 2005 (FAO, 2007).

La déforestation se poursuit au rythme d'environ 13 millions ha/an. Dans le même temps, les boisements et l'expansion naturelle des forêts ont considérablement réduit la perte nette du couvert forestier. La perte nette de forêts reste cependant de 7,3 millions d'hectares par an, soit 20 000 hectares par jour. (FAO, 2007).

1.4.2. Principales fonctions des ressources forestières

- Dans la majorité des pays situés en zone tropicale, la forêt constitue la principale et indispensable source de matériau, d'énergie et de revenu pour les états comme pour les populations. Produit et transformé par des filières essentiellement locales constituées d'artisans et de petites et moyennes entreprises, le bois constitue une matière première accessible pour les populations aux revenus limités et contribue de façon majeure à la création d'emplois.

Le niveau total de l'emploi dans les activités forestières en 2000 s'élevait à 11,0 millions de personnes (Tableau 1), dont plus de la moitié (6,0 millions) sont employées dans des activités liées à la production primaire de biens. Le niveau d'emploi est le plus haut en Asie (8,3 millions), l'Inde représentant plus de la moitié de ce chiffre et la Chine le quart (2,0 millions). Les niveaux les plus élevés concernent ensuite l'Afrique et l'Europe, l'emploi signalé étant de 0,9 million chacune, suivies de l'Amérique du Nord et centrale, avec 0,6 millions. L'emploi lié à la fourniture de services est généralement très inférieur à l'emploi dans des activités relatives à la production primaire de biens, à l'exception de l'Afrique et de l'Asie. En Afrique, cela est dû à l'inclusion de l'emploi lié à l'écotourisme en Afrique du Sud (estimé à 200 000). En Asie, ce chiffre découle de l'inclusion de 2,3 millions de personnes apparemment employées dans l'établissement et la gestion de plantations forestières. (FAO, 2005).

Région	Nombre de personnes employées (1 000 années/personnes)			Total
	Production primaire de biens	Fourniture de services	Non spécifié	
Afrique	465	305	100	870
Asie	4 425	3 008	875	8 308
Europe	412	63	471	946
Amérique du Nord et centrale	415	55	135	605
Océanie	28	4	6	37
Amérique du Sud	215	20	9	245
Monde	5 960	3 455	1 596	11 011

Tableau 1 : Nombre des personnes employées dans des activités forestières en 2000 (FAO, 2005).

- Les forêts convenablement gérées assurent une fonction importante de stockage du carbone et contribuent à lutter contre les effets du réchauffement climatique. Le bois et les autres matériaux ligno-cellulosiques homologues sont les seuls matériaux qui stockent du carbone au cours de leur élaboration et le conservent durablement après mise en œuvre sur toute la durée de vie des produits fabriqués.

Matériau	Énergie consommée (kWh/m³)	Rapport au matériau bois
Bois scié	350	1
Béton	700	2
Ciment	1 750	5
PVC	24 700	70
Acier	46 000	130
Aluminium	141 500	400

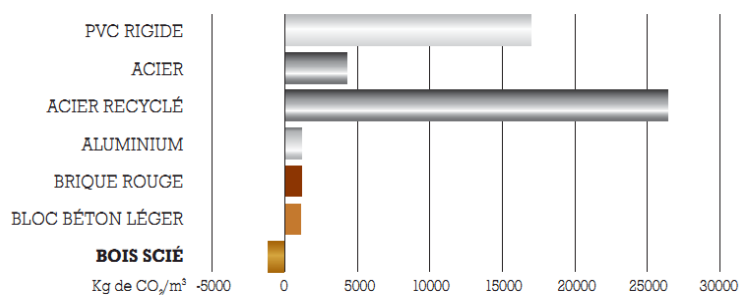


Tableau 2 : Coût énergétique comparé de quelques matériaux de construction (CNDB, 2006).

Figure 4 : Emission nette de CO₂, effet puits de carbone inclus (RTS, 2001).

Pour produire un mètre cube de bois, un arbre transforme en moyenne une tonne de CO₂, et une tonne de bois stocke durablement 500kg de carbone si elle est utilisée en construction, dans

l'habitat. La production de bois est 60 fois moins énergétivore que l'acier, 130 fois moins que l'aluminium. Comparé aux autres matériaux à haute performance, le bois présente un bilan très avantageux sur son cycle de vie, de la forêt jusqu'à l'élimination finale (Tableau 2, Figure 4). Le volume de carbone stocké dans la biomasse forestière a diminué d'environ 5.5% au niveau mondial, entre 1990 et 2005. Les tendances régionales suivent généralement celles de la superficie forestière et du matériel sur pied : les stocks de carbone augmentent en Europe et en Amérique du Nord et diminuent dans les régions tropicales. (FAO, 2007).

- Dans les régions tropicales de forêts naturelles ou plantées, les bois sont essentiellement transformés et consommés sur place ; les exportations de produits bruts ne concernent qu'une très faible part de la production (entre 10% et 20%, selon le niveau de transformation), avec toutefois des situations très contrastées selon les continents. L'approvisionnement en bois des pays tropicaux est essentiellement assuré par leur propre production. Depuis une décennie, les échanges sud-sud prennent de l'ampleur, fortement conditionnés par un infléchissement de la stratégie d'approvisionnement des pays asiatiques émergents.

En Afrique tropicale humide et en Amérique du sud, l'exploitation de ces forêts est de plus en plus souvent associée à un processus d'élaboration de plans d'aménagement durable, point de départ d'une véritable gestion à faible impact environnemental des ressources forestières, laquelle doit concilier trois volets interdépendants : exploitation et valorisation des produits forestiers, contraintes environnementales et préoccupations sociales.

Pays	Total	A des fins de production	A des fins de protection
Chine	71 326	54 102	17 224
Inde	30 028	17 134	12 894
Etats-Unis	17 061	17 061	0
Fédération de Russie	16 963	11 888	5 075
Japon	10 321	0	10 321
Suède	9 964	9 964	0
Pologne	8 757	5 616	3 141
Soudan	6 619	5 677	943
Brésil	5 384	5 384	0
Finlande	5 270	5 270	0
Total	181 693	132 095	49 597

Figure 5 : Superficie des forêts plantées, 10 principaux pays en 2005 (1 000 ha). (FAO, 2007).

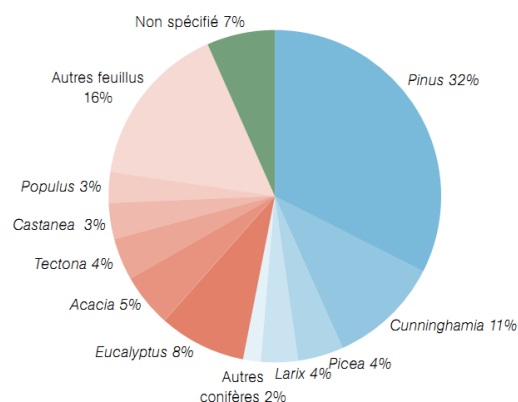


Figure 6 : Forêts plantées productives en 2005, superficie par genre. (FAO, 2007).

La fourniture de ressources forestières à vocations multifonctionnelles par les plantations à croissance rapide constitue une alternative majeure au prélèvement de type minier en forêt naturelle tropicale. Les plantations forestières représentent environ 180 millions d'hectares en région tropicale dont près de 20 millions pour les eucalyptus (plantations industrielles et paysannes).

Les forêts plantées continuent de s'étendre et leur contribution à la production mondiale de bois approche les 50%. Dix pays regroupent environ 4/5^{ème} des superficies plantées (Figure 5). Dans la catégorie des forêts plantées à des fins de production, ce sont les conifères qui prédominent, avec 54% des superficies signalées en 2005 (Figure 6), contre 39 pour cent pour les feuillus. (FAO, 2007).

En 2010, les plantations forestières devraient fournir le tiers de la consommation mondiale de bois en volume, toutes utilisations confondues. Aujourd'hui, dans les pays en développement, on estime que 2,7 millions d'hectares sont plantés chaque année : 10% en Afrique, 77% en Asie et en Océanie, 13% en Amérique latine.

Les plantations forestières en régions tropicales contribuent au développement des économies locales et nationales (création de revenus et d'emplois). A l'exception de quelques essences spécifiques (Teck, Hévéa,...), elles ont été initialement mises en place pour fournir localement du bois de feu ou alimenter les usines de pâte à papier. Une partie de ces ressources arrivées à maturité a été progressivement orientée vers la production plus rémunératrice de bois d'œuvre du fait de l'augmentation croissante de la demande locale.

1.4.3. Objectif de recherche

On assiste depuis plusieurs années à une volonté croissante d'optimiser les quantités de bois produites en fonction de la qualité attendue des produits finaux mis en œuvre (secteurs industriels : papetier, bioénergies, construction, ameublement). Cet objectif nécessite en particulier de maîtriser l'hétérogénéité des propriétés et de mieux gérer la qualité produite au cours du processus de transformation.

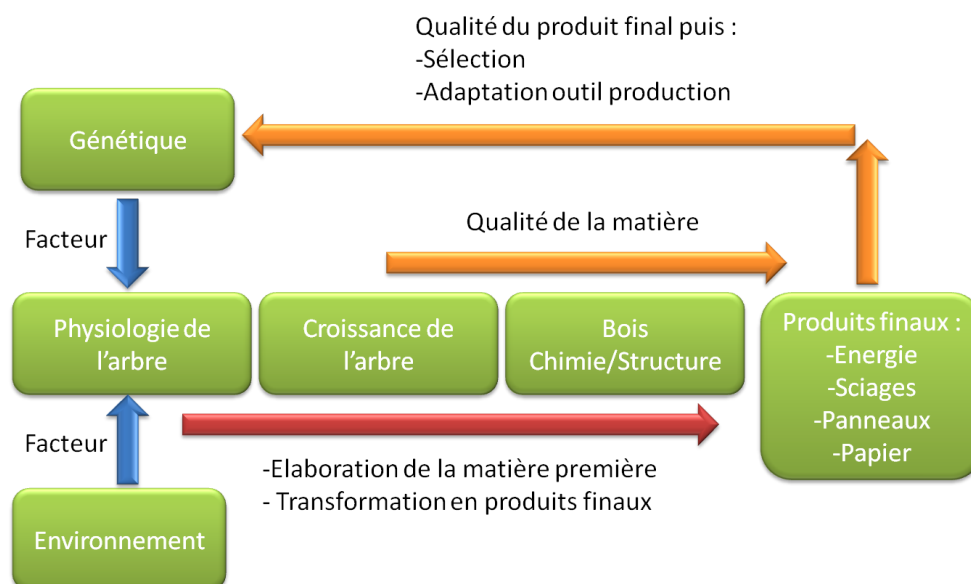


Figure 7 : Schéma d'optimisation des ressources plantées par sélection précoce en fonction des qualités attendues des produits finis.

Une solution serait de sélectionner très tôt les ressources plantées en fonction de la qualité attendue des produits finaux (papier, charbon, construction) et d'évaluer les performances tout au long du processus de transformation de ces produits (Figure 7). Cette sélection doit se faire aux champs directement sur l'arbre ou sur des prélèvements non létaux. La caractérisation est réalisée au moyen de méthodes de contrôle non destructives et rapides. La sélection et l'amélioration génétique des ressources plantées est alors faite en fonction de la qualité requise et pas seulement en fonction de la vitesse de croissance.

La caractérisation du matériau est par conséquent utile à deux niveaux. D'une part pour le sélectionneur et le gestionnaire qui ont besoin de connaître la qualité produite afin de mieux la gérer et de l'ajuster à la qualité requise. D'autre part pour le transformateur ou l'utilisateur qui doit identifier au mieux les caractéristiques du matériau en vue de qualifier, de classer et d'employer au mieux les performances de chaque élément produit.

Parmi les méthodes d'évaluation non destructive existantes, mes recherches sont associées à l'analyse des ondes acoustiques - ultrasonores et dans une moindre mesure à l'évaluation indirecte des propriétés du matériau par spectrométrie proche infrarouge. Les statistiques d'analyse multivariée, factorielle, classification et régression sont nécessaires à l'étalonnage et à l'analyse des performances de ces méthodes.

1.4.4. Questions de recherche

- Mesurer et modéliser la réponse dynamique linéaire (à une onde élastique) d'une structure macroscopique (milieu couplant et bio - matériau), comprenant totalement, ou en partie, le bio - matériau orthotrope (problème direct, 1D et 2D).
- Comprendre et modéliser l'effet des hétérogénéités du bio - matériau sur la propagation des ondes mécaniques dans le domaine linéaire (problème direct, 1D et 2D).
- Déterminer les paramètres intrinsèques (théorie de l'élasticité linéaire et viscosité) du bio - matériau à partir de sa réponse dynamique (problème inverse, 1D et 2D).
- Comprendre et établir les relations entre paramètres intrinsèques obtenus à partir de la réponse dynamique et paramètres normalisés obtenus selon les référentiels normatifs.
- Caractérisation par reconstruction tomographique des paramètres intrinsèques (imagerie 2D et 3D) des bio – matériaux orthotropes.

2. Etude bibliographique

2.1. Principes du contrôle non destructif

Le contrôle non destructif (CND) est l'ensemble des méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux sans les dégrader (sans altérer leur fonction d'usage). Le développement des méthodes de contrôle non destructif a débuté vers les années 1960-1970 pour répondre aux demandes de secteurs comme celui du nucléaire, de l'aéronautique ou du domaine spatial. Le CND a progressivement élargi son champ d'application en passant du strict domaine de la détection, de la reconnaissance et du dimensionnement de défauts localisés à celui de l'évaluation des caractéristiques intrinsèques des matériaux. La notion de défaut est définie en fonction de l'utilisation qui sera faite du produit (satisfaction finale du client). (Hellier, 2001 ; Wanin, 2001 ; Shull, 2002).

Procédé CND	Méthode de contrôle	Principe physique	Champ d'application
Optique	Examen visuel direct ou assisté	Altération de la couleur et de la forme	Etat extérieur d'un objet
	Shearographie	Interferométrie de 2 images d'un objet éclairé par une source à large faisceau	Déformation de surface
	Thermographie infrarouge	Diffusion de la chaleur	Propriété thermophysique de surface
Fluide	Etanchéité	Fuite d'un gaz traceur	Contrôle d'étanchéité
	Ressuage	Ressuage d'un liquide pénétrant par capillarité	Détection de défauts débouchants
Electromagnétiques	Courants de Foucault	Fluctuation du champ magnétique; variation d'impédance de la bobine excitatrice	Détection de défauts débouchants
	Magnétoscopie	Visualisation de la déformation du champ magnétique	Détection de défauts de surface
Ondes mécaniques	Émission acoustique	« Ecoute » passive des ondes propagatives	Détection de défauts internes et de surface
	Acoustique / Ultrasons	Emission – réception d'ondes mécaniques	Détection de défauts internes et de surface. Propriétés mécaniques
Rayonnements ionisants	Radiographie	Atténuation d'un flux de rayons X ou γ	Détection de défauts internes
	Neutronographie	Atténuation d'un flux de neutrons	Détection de défauts internes (produits contenant de l'hydrogène)

Tableau 3: Récapitulatif des principales méthodes de contrôle non destructif avec leurs champs d'application.

Le CND peut prendre des aspects très différents car il doit s'adapter aux problématiques industrielles et aux particularités de chaque objet produit (Tableau 3). Concernant la détection de défaut (hétérogénéités localisées), trois techniques sont privilégiées pour les défauts internes (craques, porosités, inclusions) : la radiographie, les ultrasons et l'émission acoustique. La détection des défauts de surface (craques, décohésion, rayures) relève d'un grand nombre de techniques dont notamment : optique, ressuage, courants de Foucault, magnétoscopie et ultrasons. Concernant l'évaluation des caractéristiques intrinsèques, les principales techniques utilisées sont : les méthodes optiques pour l'aspect et les propriétés de surface, les ultrasons et les rayons X pour les propriétés de la matière. (Hellier, 2001 ; Wanin, 2001 ; Shull, 2002).

2.2. Vibrations mécaniques

2.2.1. Principes physiques

Les ondes acoustiques et ultrasonores (ou élastiques) sont des perturbations d'un milieu déformable (fluide ou solide) se propageant de proche en proche dans celui-ci par les actions des particules élémentaires sur leurs voisines. Ces ondes n'existent pas dans le vide (pas de support de propagation). (Bruneau, 2006).

Les sons audibles (ou acoustiques) sont des ondes élastiques dont la fréquence est comprise entre 10 Hz et 20 kHz (Figure 8). Les ultrasons ont des fréquences supérieures à celles des sons audibles par l'oreille humaine et inférieures aux fréquences de vibration thermique des atomes (environ 1GHz). On distingue également les infrasons et les hypersons. Un infrason est une onde dont la fréquence est inférieure à 20 Hz. Il est donc trop grave pour être perçu par l'oreille humaine (sa fréquence est trop basse). Les hypersons sont des ondes ayant une fréquence supérieure au GHz. Typiquement ce sont les excitations spontanées qui existent dans un milieu (liquide, solide ou gaz) dues à l'agitation thermique. (Blauert, 2009).

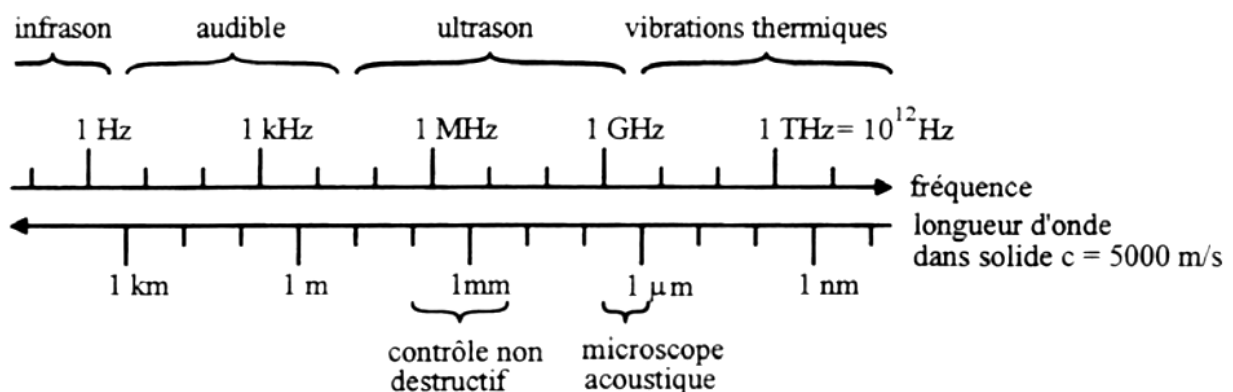


Figure 8 : Echelle des ondes élastiques. Les longueurs d'ondes sont données pour un solide ayant une vitesse du son de 5000 m/s.

2.2.2. Ondes élastiques dans les milieux infinis

L'état mécanique d'un solide élastique est défini par les relations entre les efforts internes et les déformations locales en chaque point ou particule du solide. L'équation fondamentale du mouvement (résultante et moment dynamique) applicable au cas des petites déformations s'écrit (Berthelot, 2005) :

$$1 \quad \operatorname{div}(\sigma \cdot \vec{n}) + \vec{f} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$$

Avec σ : tenseur des contraintes, \vec{n} : vecteur unitaire, \vec{f} : forces extérieures, ρ : masse volumique et \vec{u} : vecteur déplacement. En l'absence de forces extérieures et pour simplifier les écritures, on considère le vecteur σ des composantes indépendantes du tenseur σ . L'équation 2 devient alors :

$$2 \quad [D] \cdot \vec{\sigma} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$$

Avec D : matrice des composantes de l'opérateur divergence dans le système de coordonnées choisies. On choisit d'exprimer la loi de Hooke généralisée sous sa forme matricielle, de même pour la relation entre vecteur déplacement et vecteur déformation. L'équation 2 s'écrit alors sous la forme :

$$3 \quad [D] \cdot [C] \cdot [M] \cdot \vec{u} = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$$

Avec C : matrice de rigidité, M : matrice de relation entre vecteur déplacement et vecteur déformation. En coordonnées cartésiennes et pour un matériau orthotrope, l'équation 3 devient :

$$4 \quad \left(\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \begin{bmatrix} \left(C_{11} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + C_{44} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + C_{66} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) & (C_{12} + C_{44}) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} & (C_{13} + C_{66}) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z} \\ (C_{12} + C_{44}) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} & \left(C_{22} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + C_{44} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + C_{55} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) & (C_{23} + C_{55}) \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} \\ (C_{13} + C_{66}) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z} & (C_{23} + C_{55}) \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} & \left(C_{33} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + C_{66} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + C_{55} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \end{bmatrix} \right) \vec{u} = \vec{0}$$

Dans le cas d'un solide orthotrope infini, parmi les ondes de volume sphérique, cylindrique ou plane, on s'intéresse aux solutions de l'équation 4 pour des ondes planes progressives harmoniques. Une onde sphérique ou cylindrique peut être considérée comme plane à une distance suffisamment éloignée de la source.

Une onde plane progressive harmonique, de fréquence f_0 et de vitesse v_0 , possède une double périodicité temporelle $1/f_0$ et spatiale $\lambda = v_0 / f_0$, sa longueur d'onde. On définit également le vecteur d'onde \vec{k} colinéaire à la direction de propagation (ayant pour norme $2\pi / \lambda$) et la polarisation \vec{p} , vecteur unitaire colinéaire au déplacement \vec{u} . En notation complexe, le déplacement s'écrit alors :

$$5 \quad \vec{u}(M) = \vec{p} \cdot U_0 \cdot \exp[j(2\pi \cdot f_0 \cdot t \pm \vec{k} \cdot \vec{OM})]$$

Pour une propagation dans la direction OX le vecteur déplacement u n'est fonction que de x , l'équation 4 devient :

$$6 \quad \left(\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \begin{bmatrix} C_{11} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ C_{44} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ C_{66} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \end{bmatrix} \right) \vec{u} = \vec{0}$$

On retrouve l'équation de d'Alembert (1747, historiquement c'est la première équation d'onde) pour chacune des composantes de \vec{u} avec des vitesses de propagation respectives $\sqrt{C_{11}/\rho}$ dans le cas d'une

onde longitudinale et $\sqrt{C_{44}/\rho}$, $\sqrt{C_{66}/\rho}$ dans le cas des deux ondes transversales. Une onde longitudinale est constituée d'une suite de compressions et de dilatations dont la polarisation (le déplacement des particules de la matière) est parallèle à la direction de propagation. Une onde transversale est constituée de mouvements de cisaillement dont la polarisation est transversale, c'est-à-dire perpendiculaire à la direction de propagation (Figure 9). (Royer, 2001 ; Lefebvre, 2004).

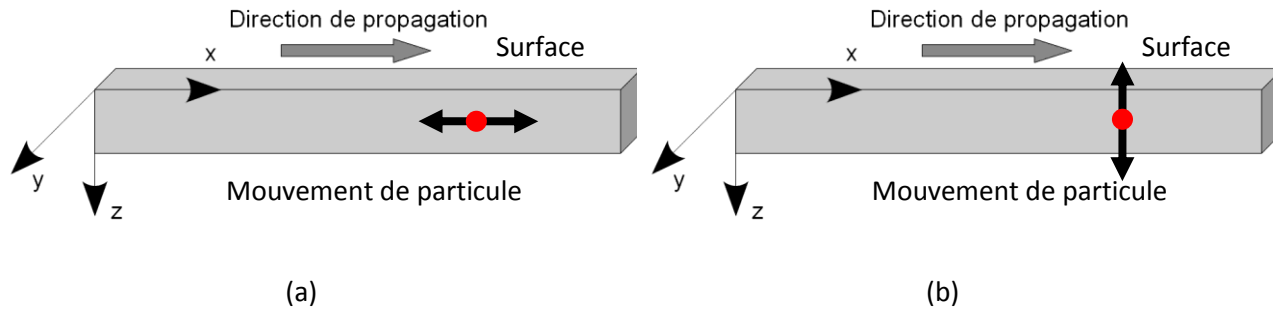


Figure 9 : Ondes planes progressives harmoniques dans les milieux infinis, de type longitudinale (a) et transversale (b).

Pour une propagation dans la direction \overrightarrow{OY} ou \overrightarrow{OZ} , les mêmes conclusions sont obtenues. Pour un solide isotrope infini, une seule onde transversale existe car C_{44} est égal à C_{66} . Le cas où la direction de propagation n'est pas colinéaire à un des axes de symétrie matériel se déduit de l'équation 3 par rotation de la matrice de complaisance. On retrouve alors le cas général de l'équation de Christoffel (1869). Il y a alors propagation de trois types d'onde, pour un matériau anisotrope, dont la polarisation n'est plus ni parallèle, ni perpendiculaire à la direction de propagation. L'onde dont la direction de polarisation est la plus proche de la direction de propagation prend le nom d'onde quasi longitudinale QL et les deux autres, d'ondes quasi transversales QT. (Royer, 2001 ; Lefebvre, 2004).

2.2.3. Ondes élastiques dans les milieux bornés (ondes modales)

Les ondes décrites précédemment sont les solutions particulières de l'équation de propagation (4) pour des milieux infinis. En fait, les solides sont bornés et les solutions doivent satisfaire à des conditions aux limites. On distingue alors les ondes de surface pour des milieux semi-infinis (notamment Rayleigh, Lamb et Love) et les ondes de vibration des corps solides (compression, flexion, torsion). (Royer, 2001).

A la surface d'un milieu orthotrope semi-infini une onde à trois composantes peut se propager. Elle porte le nom de *Rayleigh* qui l'a découverte en 1885. La composante longitudinale et les composantes transversales sont déphasées et la polarisation est donc elliptique. Les amplitudes de ces composantes décroissent différemment avec la profondeur (Figure 10-a). Lorsqu'un solide est limité par deux plans parallèles (plaque), les ondes de *Rayleigh* se propagent indépendamment sur chacun des plans tant que leur distance est grande devant la longueur d'onde. Quand l'épaisseur de la plaque devient de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, les composantes des ondes de surface se couplent et donnent naissance à des ondes de *Lamb* symétriques ou antisymétriques. (Royer, 2001).

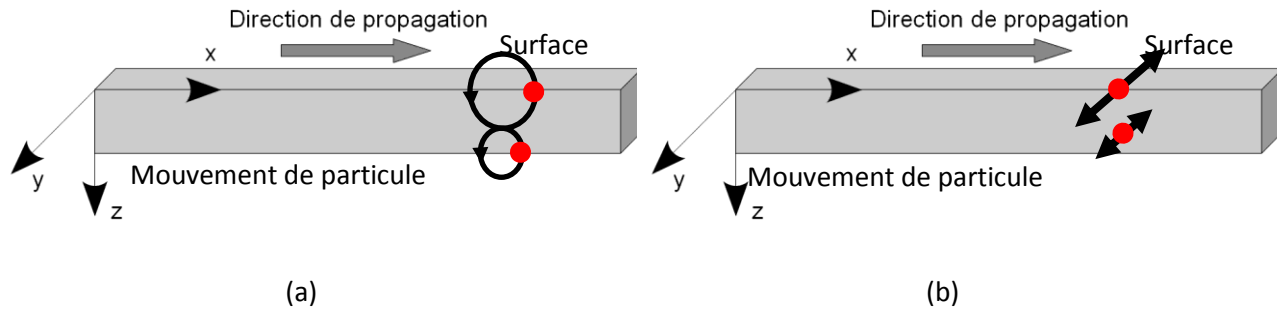


Figure 10 : Onde de surface dans un milieu semi-infini, de Rayleigh (a) et de Love (b).

Une onde transversale, de polarisation parallèle au plan de la surface et perpendiculaire à la direction de propagation, satisfait également à la condition aux limites d'un milieu semi-infini. Cette onde a deux composantes dans le cas d'un milieu orthotrope. Elle a été découverte par *Love* en 1911 et porte son nom. Comme dans le cas des ondes de *Rayleigh*, l'amplitude du mouvement décroît avec la profondeur (Figure 10-b).

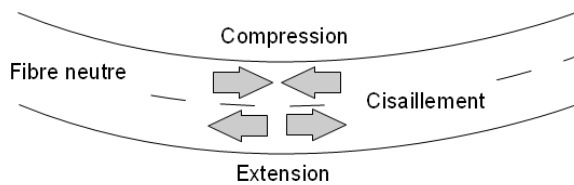


Figure 11 : Mouvements longitudinaux et transversaux en vibration de flexion.

Les ondes de vibration des corps solides sont de trois types : compression, flexion, torsion (Plusquellec, 1991). Ces ondes ont pour origine des ondes propagatives (Figure 9) mais pour résultante des ondes stationnaires en raison des réflexions multiples aux interfaces. Elles ont une infinité de fréquences particulières (discrètes) appelées fréquences de résonance. (Chaigne, 2001).

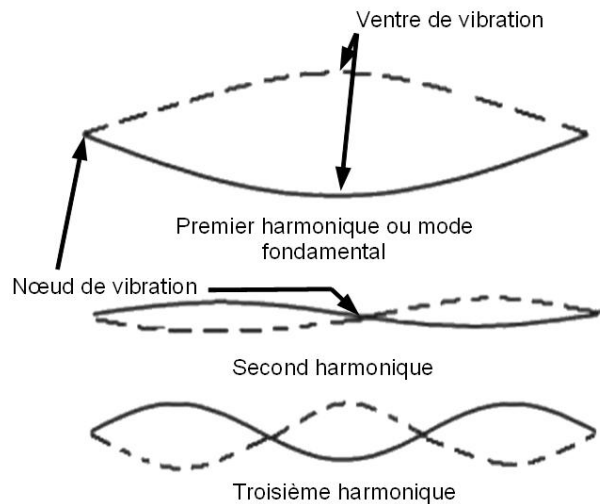


Figure 12 : Déformée d'une poutre en vibration de flexion selon la fréquence de résonance.

Du fait de leur nature stationnaire (Figure 12), elles possèdent des ventres (amplitude maximale du mouvement) et des nœuds de vibration (amplitude nulle du mouvement). Les vibrations de compression (ou longitudinales) sont analogues aux vibrations longitudinales propagatives (Figure 9). Les vibrations de torsion sont analogues aux vibrations transversales propagatives (Figure 9). Le mouvement de torsion fait intervenir deux constantes élastiques de cisaillement du fait de la 'rotation' autour de la direction de propagation. Les vibrations de flexion constituent le dernier type et sont les plus délicates à définir. Elles sont constituées de mouvements longitudinaux 'antisymétriques' de part et d'autre de la fibre neutre associés à des mouvements de cisaillement dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation (Figure 11). Pour les premières fréquences de résonance, les mouvements longitudinaux sont

prépondérants. Pour des fréquences de résonance élevées, ce sont les vibrations de cisaillement qui sont prépondérantes. Toutes les vibrations de corps solide sont dispersives (pas seulement par l'effet visco-élastique) et ce sont les vibrations de flexion qui possèdent cette propriété la plus marquée. En ultrason on étudie des ondes progressives, en acoustique des ondes stationnaires (dans le cas d'une très forte atténuation, on peut avoir des ondes progressives dans le domaine acoustique). (Kolsky, 1953 ; Graff, 1975).

2.2.4. Transformations des ondes lors de la propagation (dispersion, atténuation et réflexion)

Au cours de leur propagation dans un milieu homogène borné (cas réel), les ondes sont dispersées, atténuées et réfléchies aux extrémités. Dans un milieu dispersif, la vitesse de phase dépend de la fréquence de l'onde (relation de dispersion). Des ondes de fréquence différente, initialement « rassemblées » en un même point (on parle de paquet d'ondes, cas d'une excitation par une impulsion en Figure 13 par exemple), se propagent dans le matériau à des vitesses différentes et sont ainsi dispersées. Dans le cas d'un milieu dispersif, donner une valeur de vitesse de propagation n'a de sens que si on indique également la fréquence de l'onde associée. Le phénomène de dispersion des ondes peut s'accompagner du phénomène d'amortissement (atténuation au cours de la propagation). (Graff, 1975).

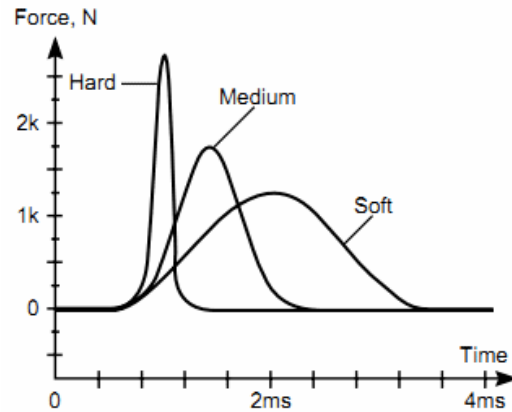


Figure 13 : Forme d'impulsion produite au marteau force avec différents embouts (métal « hard », plastique dur « medium », caoutchouc « soft »). (Source : documentation technique Bruel & Kjaer, type 8202).

La vitesse de groupe correspond à la vitesse du paquet d'ondes et, pour les milieux peu dispersifs, correspondra également à la vitesse de propagation de l'énergie. Dans le cas d'un paquet d'ondes centré sur une fréquence (Figure 14-a), la vitesse de phase correspond à la fréquence « moyenne » (par exemple la partie réelle d'une ondelette de Morlet, équivalente à un filtre passe bande). Si la largeur spectrale du paquet n'est pas trop importante et le milieu peu dispersif, l'enveloppe du paquet d'ondes garde un maximum que l'on peut continuer à repérer : ce maximum se propage, comme l'enveloppe, à la vitesse de groupe. L'énergie, localisée au niveau du paquet d'ondes, c'est-à-dire du maximum de l'enveloppe, se propage donc elle-même dans ce cas à la vitesse de groupe (Figure 14-b). (Krautkraemer, 1990 ; Perdijon, 1993).

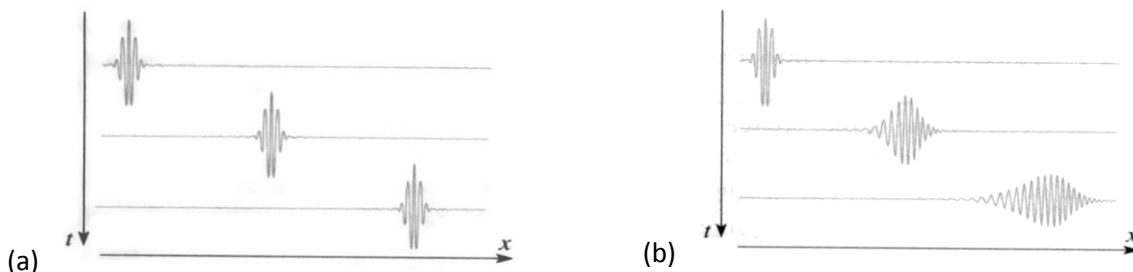


Figure 14 : Propagation d'un paquet d'onde. (a) milieu non dispersif, (b) milieu dispersif.

Dans le cas où deux milieux sont séparés par une interface plane, la nature des ondes réfléchies et transmises à l'interface dépend de la nature de l'onde incidente et de la nature des milieux.

Sous incidence normale (Figure 15), une onde progressive rencontrant l'interface va donner naissance à une onde réfléchie et à une onde transmise dans la même direction. L'onde réfléchie et l'onde transmise sont de même nature que l'onde incidente (longitudinale ou transverse). Une onde stationnaire est le résultat de la superposition de deux ondes progressives de même amplitude se propageant en sens inverse. Ce phénomène se produit par réflexion aux interfaces d'un milieu fini (poutre, plaque...). (Perdijon, 1993 ; Sapriel, 1994).

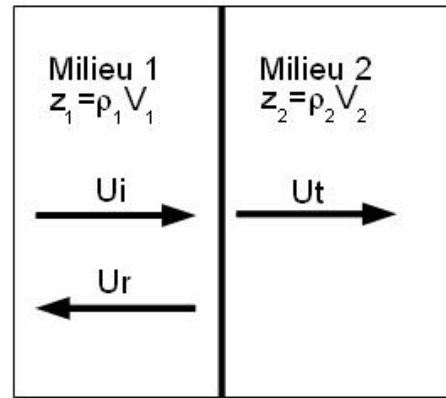


Figure 15 : Réflexion et transmission sous incidence normale.

Les coefficients de réflexion et de transmission en énergie s'expriment en fonction de l'impédance acoustique des deux milieux Z_1 et Z_2 :

$$R = \frac{U_r^2}{U_i^2} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

$$T = \frac{U_t^2}{U_i^2} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Avec U : amplitude de l'onde, Z : impédance acoustique, ρ : masse volumique, V : vitesse de propagation. L'égalité $R+T=1$ exprime la conservation de l'énergie à l'interface. Pour $Z_1/Z_2 \gg 1$ ou $Z_1/Z_2 \ll 1$, R est voisin de 1; il y a peu d'énergie transmise. Par contre, si $Z_1/Z_2 = 1$, la transmission est quasi totale. Dans ce cas, les deux milieux sont adaptés acoustiquement. Dans beaucoup d'expériences, les impédances acoustiques sont très différentes (Tableau 4) et, pour augmenter la transmission, on a recours soit à un changement graduel de l'impédance acoustique à l'interface, soit à une couche intermédiaire d'adaptation d'impédance (c'est le rôle d'un milieu couplant pour des essais ultrasonores).

Matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Vitesse de propagation (m/s)	Impédance acoustique (N.s.m ⁻³)
Air (à 20°C)	1,2	340	410
Eau	1000	1500	1,5 .10 ⁶
Acier	8000	5100	40 .10 ⁶
Verre	2500	5300	13 .10 ⁶
Béton	2200	4000	9 .10 ⁶
Polyéthylène haute densité	950	1300	1,2 .10 ⁶
Polychlorure de vinyle	1400	1300	1,8 .10 ⁶
Bois (sens Longitudinal)	500	5000	2,5 .10 ⁶
Bois (sens Tangentiel)	500	1400	0,7 .10 ⁶
Bois (sens Radial)	500	1100	0,6 .10 ⁶

Tableau 4 : Ordre de grandeur des propriétés acoustiques de matériaux usuels.

Sous incidence oblique (Figure 16), l'onde acoustique incidente est réfléchiée et réfractée sous plusieurs angles, avec changement de polarisation. C'est ce qui est appelé la conversion de mode. Cette conversion peut se produire aussi bien par réflexion (onde dans le milieu d'incidence) que par transmission (onde dans le deuxième milieu). (Sapriel, 1994). Les angles de réflexion et de transmission s'expriment comme par les lois de *Snell* (1621) – *Descartes* (1637) (Figure 16) :

$$8 \quad \frac{\sin(i)}{V_{L1}} = \frac{\sin(r)}{V_{L2}} = \frac{\sin(i')}{V_{T1}} = \frac{\sin(r')}{V_{T2}}$$

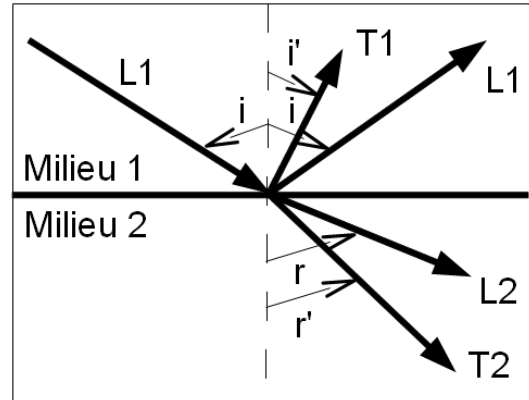


Figure 16 : Réflexion et transmission sous incidence oblique (milieu isotrope).

Au-dessus d'une certaine valeur critique I_{LC} de l'angle incident pour les ondes longitudinales, il n'y a plus d'onde acoustique longitudinale réfractée (équation 9). Toute l'énergie est transmise sous forme d'ondes transverses.

$$9 \quad \sin(I_{LC}) = \frac{V_{L1}}{V_{L2}}$$

$$10 \quad \sin(I_{TC}) = \frac{V_{L1}}{V_{T2}}$$

Il existe un autre angle critique I_{TC} pour les ondes longitudinales incidentes au-delà duquel il n'y a plus d'énergie acoustique transmise sous forme ni d'ondes longitudinales, ni d'ondes transverses (équation 10). L'énergie acoustique est alors transmise sous forme d'onde acoustique de surface qui se propage parallèlement à l'interface et dont l'amplitude de déplacement diminue de manière exponentielle au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'interface. (Lefebvre, 2004).

En acoustique, le phénomène de conversion de mode fait qu'un corps solide, soumis par exemple à un impact, aura toujours tendance à vibrer selon tous ses modes de déformation (compression, flexion et torsion dans toutes les directions matérielles). L'impact ne fait que 'privilégier' un mode de déformation par rapport à tous les autres. Il est donc possible d'observer des vibrations de flexion après une sollicitation longitudinale par exemple.

2.3. Capteurs acoustiques et ultrasonores

2.3.1. Accéléromètre

Un accéléromètre est un capteur de mesure des vibrations ponctuelles à contact (Figure 17). Il doit être fixé à l'objet et permet de mesurer l'accélération linéaire de ce dernier. L'accélération se définit en m/s^2 (SI), mais également en g ($9,8 \text{ m/s}^2$). Plus un accéléromètre est petit, moins il est sensible et inversement.

Le capteur étant fixé à l'objet, sa masse ne doit pas affecter le comportement dynamique de la pièce en vibration. Il ne faut pas que la masse du capteur dépasse le dixième de la masse dynamique de la structure. La gamme de fréquences utiles dépend du capteur lui-même mais également de la manière dont il est fixé : collage, cire, contact simple par pression (Figure 18).



Figure 17 : Accéléromètre (Source Bruel & Kjaer, type 4397).

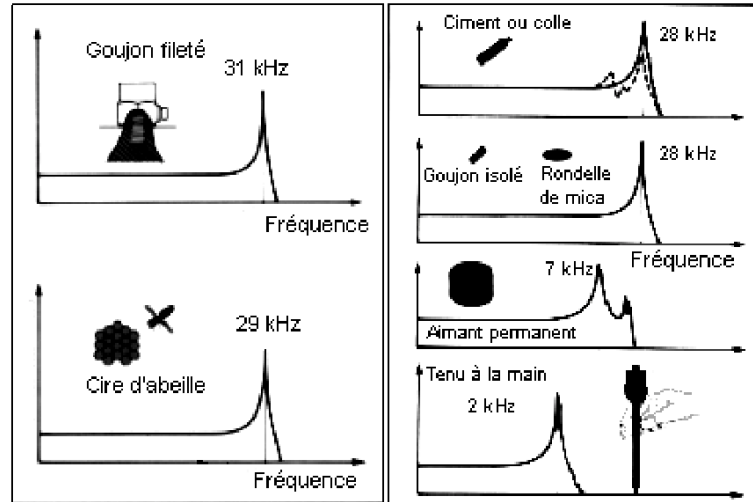


Figure 18 : Influence du mode de montage d'un accéléromètre sur la gamme de fréquence utile.

2.3.2. Microphone

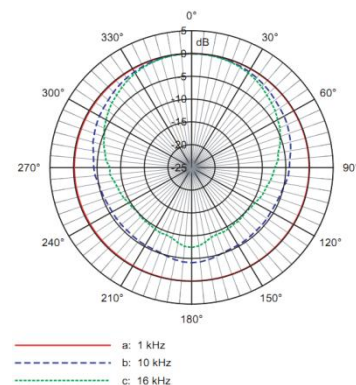
Un microphone est un capteur de mesure des vibrations rayonnées sans contact (Figure 19-a). Il convertit les ondes acoustiques d'un milieu compressible en tensions électriques (variation de pression). Le principe de la mesure repose sur l'utilisation d'une partie mobile, le diaphragme ou membrane, que les ondes viennent exciter. Les variations de pression mesurées sont liées à l'accélération des particules par l'équation d'Euler (1755, cas d'un fluide parfait, cas de faibles amplitudes) :

$$\vec{\rho} \vec{a} = -\vec{\text{grad}}(p)$$

Avec ρ : masse volumique du fluide, a : accélération, p : pression. Une des principales caractéristiques d'un microphone est sa directivité (Figure 19-b).



(a)



(b)

Figure 19 : (a) Microphone, (b) diagramme de directivité, type cardioïde large (Source Bruel & Kjaer, type 4955).

2.3.3. Vibromètre laser

Un vibromètre laser est un capteur de mesure de vibrations ponctuelles sans contact (Figure 20). Il est constitué d'une source de lumière monochromatique (laser) et d'un interféromètre, permettant de mesurer l'effet Doppler dû à la vibration entre le signal émis et le signal réfléchi. En principe, le vibromètre peut mesurer directement le déplacement ainsi que la vitesse. Dans le cas du déplacement, la fréquence Doppler n'est pas transformée en tension directement proportionnelle à la vitesse, les franges d'interférences « sombres-claires » sont dénombrées sur le détecteur puis ce nombre est converti en déplacement.



Figure 20 : Vibromètre laser portable monopoint (Source Polytec, type IVS 400).

2.3.4. Marteau force

Un marteau force (ou d'impact, ou instrumenté) est utilisé pour mettre l'objet en vibration par un choc (Figure 21). La gamme de fréquences utiles dépend de l'objet testé mais également de la nature de l'embout d'impact (Figure 13) et de la masse du marteau. Le marteau est muni d'un capteur de force et mesure l'évolution de la force appliquée en fonction du temps (sensibilité en mV/N). Le capteur de force fait appel à un élément piézo-électrique tout comme les accéléromètres.



Figure 21 : Marteau instrumenté (Bruel & Kjaer, type 8202).

2.3.5. Pot vibrant

Un pot vibrant (ou excitateur, ou vibreur) permet d'exciter une structure en vibration par un signal quelconque (Figure 22). Une bobine est traversée par un courant électrique et placée dans un champ magnétique. La force résultante (Force de Laplace) va mettre en mouvement le pot vibrant. Le pot vibrant fonctionne avec un amplificateur électronique de forte puissance nécessaire à l'alimentation de la bobine ; un accéléromètre et un contrôleur qui permettent d'asservir les vibrations.



Figure 22 : Pot vibrant (Source Bruel & Kjaer, type LDS V201).

La mise en place d'un système d'essai en vibrations nécessite de prendre certaines précautions. Par exemple, il faut prendre en compte la réaction du vibreur sur le bâtiment dans lequel il est placé. On

doit donc le placer sur une masse isolée mécaniquement du reste du bâtiment, ou bien utiliser un système de suspension.

2.3.6. Transducteur ultrasonore

Un transducteur ultrasonore (Figure 23) est un émetteur ou un capteur ponctuel à contact (il existe également des transducteurs immergés ou air-matériau-air). La majorité des transducteurs utilisent l'effet piézoélectrique pour transformer une onde mécanique en tension électrique (et inversement). En appliquant une tension électrique (signal d'émission) sur un cristal piézoélectrique, le cristal se comprime et se décomprime alternativement et émet une vibration dont la fréquence dépend des caractéristiques du cristal. Le même élément est utilisé pour transformer en tension électrique les ultrasons qui reviennent vers la sonde. L'utilisation d'un milieu couplant (fluide, graisse, caoutchouc...) permet la transmission des ondes entre le transducteur et le matériau.



Figure 23 : Transducteur ultrasonore (Source Euro Physical Acoustics, type SH10).

2.3.7. Accélération, vitesse, déplacement

Les capteurs acoustiques ne mesurent pas tous la même grandeur physique (accélération, vitesse ou déplacement). Dans le cas d'un signal de déplacement du type :

$$12 \quad u(t) = U_0 \exp(-\alpha t) \exp[i(\omega t + \varphi)]$$

Avec u : déplacement mesuré en un point du solide, t : temps, U_0 : amplitude initial, α : amortissement (fonction croissante de la pulsation), ω : pulsation, φ : phase. La vitesse v se déduit par la dérivée du déplacement ce qui donne la fonction de vitesse suivante ($\alpha \ll \omega$) :

$$13 \quad \frac{v(t)}{u(t)} \approx \omega \left(1 + \frac{\alpha^2}{2\omega^2} \right) \exp \left[i \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{\omega} \right) \right]$$

Cette équation montre que la vitesse est en avance de phase de 90° sur le déplacement. L'accélération a se déduit par la dérivée seconde du déplacement, ce qui donne la fonction d'accélération suivante ($\alpha \ll \omega$) :

$$14 \quad \frac{a(t)}{u(t)} \approx \omega^2 \left(1 + \frac{\alpha^2}{\omega^2} \right) \exp \left[i \left(\pi + 2 \frac{\alpha}{\omega} \right) \right]$$

Cette équation montre que l'accélération est en avance de phase de 180° sur le déplacement et donc de 90° sur la vitesse. Pour les signaux sinusoïdaux, déplacement, vitesse et accélération sont reliés par une fonction de la fréquence (l'accélération sera très supérieure au déplacement pour des fréquences élevées).

2.4. Contrôle acoustique

Quatre grands domaines de mesure vibratoire peuvent être définis. (Ole Døssing, 1988).

1. Analyse structurelle : Il s'agit d'une méthode expérimentale se basant sur les mesures des vibrations pour déterminer le comportement dynamique d'une structure, allant des petites pales de turbine aux grands ponts. En utilisant par exemple un capteur de force et un accéléromètre, le signal d'excitation et la réponse vibratoire de la structure sont mesurés simultanément à l'aide d'un analyseur multivoie.
2. Test de vibration : Pour valider la tenue réelle d'un produit à l'environnement et donc sa conception, le test de vibration est pratiqué en soumettant une structure (une caisse automobile par exemple) à de hauts niveaux vibratoires avec un excitateur. Le niveau de vibrations est maintenu constant dans des gammes de fréquence définies. Les informations sur la réponse fréquentielle de la structure sont obtenues.
3. Surveillance de l'état des machines et diagnostic des défauts : Dans sa forme la plus simple, une mesure du niveau global de vibration d'une machine est utilisée afin de signaler tout problème. Cependant, d'autres informations sont requises pour une détection fiable et précoce des défauts : la mesure du spectre fréquentiel caractéristique des vibrations d'une machine en bon état (référence) est comparée à celle de la machine testée. Tout changement concernant les composantes spectrales par rapport à la référence est un indicateur du degré d'endommagement. De tels changements sont en effet le reflet d'une modification des éléments tournants et de la structure.
4. Mesure des vibrations appliquées à l'homme : Ce domaine concerne la mesure des vibrations transmises à l'homme. Ces vibrations peuvent provenir, par exemple de véhicules ou d'outils à main portatifs. Les niveaux de vibrations mesurées sont ainsi modifiés pour satisfaire au confort humain et aux critères de santé stipulés dans les normes internationales (ISO).

Plus particulièrement, l'analyse structurelle et le test de vibration font tous deux appels à l'analyse modale expérimentale. L'analyse modale expérimentale permet l'identification du comportement dynamique des structures. Les caractéristiques à extraire sont les fréquences de résonance, les amortissements (fonction de réponse en fréquence) et les déformées modales associées.

Il existe deux méthodes pour déterminer les fréquences propres d'un système : (1) l'utilisation d'un pot vibrant en laboratoire (balayage en fréquence ou bruit rose si possible) ; (2) l'utilisation d'un marteau d'impact pour une analyse modale de structure, la pièce étant excitée successivement en plusieurs points et la réaction vibratoire mesurée à l'aide d'un capteur d'accélération (accéléromètre, vibromètre laser). L'analyse au marteau d'impact peut être utilisée pour une caractérisation in situ de la structure.

Ces méthodes conduisent à la détermination de la fonction de transfert (réponse impulsionnelle en temps, fonction de réponse en fréquence). Dans le cas d'un système linéaire invariant dans le temps

(système régi par une équation du mouvement linéaire à coefficient constant), le signal de sortie et le signal d'entrée sont liés par l'opération de convolution (Plusquellec, 1991) :

$$15 \quad s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) e(t - \tau) d\tau$$

Avec s : signal de sortie, t : temps, h : réponse impulsionnelle, e : signal d'entrée. Dans le cas où l'entrée est un Dirac, la sortie est égale à la fonction h . La fonction de réponse en fréquence est la transformée de Fourier de h . Dans le cas pratique, elle est généralement estimée en utilisant des méthodes définies pour les processus aléatoires (alors que le système étudié est déterministe) en raison du bruit de mesure :

$$16 \quad H(\omega) = \frac{S_{s,e}(\omega)}{S_{e,e}(\omega)}$$

Avec $S_{s,e}$: densité spectrale de puissance d'interaction entre sortie et entrée, $S_{e,e}$: densité spectrale de puissance de l'entrée. La fonction de réponse en fréquence ainsi estimée permet la détermination des fréquences de résonance et des amortissements associés.

Le système est alors caractérisé à l'aide de ces paramètres en utilisant un modèle analytique (solution suffisamment exacte des équations de la dynamique pour un système continu et borné, possédant par définition une infinité de degré de liberté et donc une infinité de fréquences propres), un modèle équivalent avec un empilement d'éléments masses – ressorts – amortisseurs en série et/ou en parallèle (exemple Figure 24) ou un modèle par éléments finis.

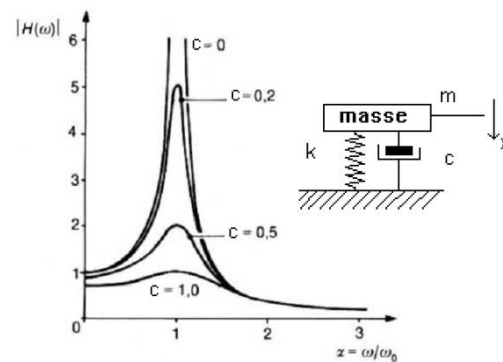


Figure 24: Module de la fonction de réponse en fréquence pour un système à 1 degré de liberté (Plusquellec, 1991). Les différentes courbes représentent plusieurs cas de facteur d'amortissement 'c'.

L'identification des déformées modales est faite à partir de plusieurs mesures de déformation de la structure en différents endroits (Figure 25). La visualisation d'une déformée comparée aux déformées obtenues par modélisation analytique ou par éléments finis permet une identification du rang des fréquences propres dans le cas de système 'complexe'.

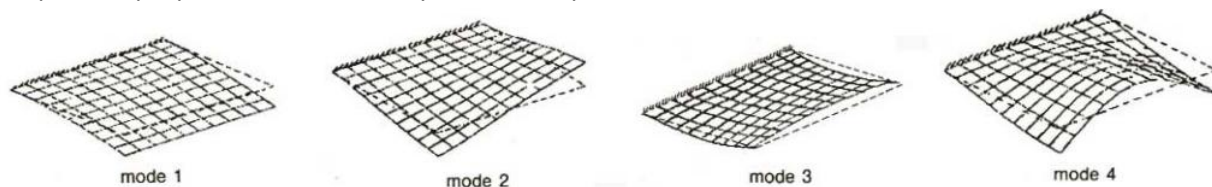


Figure 25: Déformée modale d'une plaque carrée encastree suivant l'un de ses bords pour les 4 premiers modes de déformation (Plusquellec, 1991).

Les paramètres issus de l'analyse du signal associés au modèle de vibration permettent de caractériser les paramètres intrinsèques du système (complaisances élastiques et frottements internes). Ils permettent également de dimensionner précisément l'ajout de masse ou de raideur sur la structure pour diminuer la gêne engendrée pour l'utilisateur (absorbeur de vibration dynamique, ou élastomère anti-vibratile dans l'automobile par exemple). Des calculs par éléments finis peuvent aussi permettre de calculer la vibration maximum admissible sur la structure afin d'éviter un risque de ruine par fatigue vibratoire.

2.5. Contrôle ultrasonore

Le principe du contrôle non destructif par ultrasons réside dans l'analyse de l'influence des défauts (localisés ou inhomogénéités de structure) sur la propagation des ondes dans le matériau. Cette influence peut se traduire par de la réflexion, réfraction (déviation d'une onde lorsque sa vitesse change entre deux milieux) et diffraction (diffusion d'une onde par le défaut qui se comporte alors comme une source). Cette influence induit les phénomènes mesurables d'atténuation et de temps de propagation. (Lefebvre, 2004).

Le sondage ultrasonore peut se faire en réflexion et en transmission. La méthode la plus employée dans le contrôle ultrasonore est l'échographie (réflexion). Elle consiste à utiliser un seul transducteur en émetteur-récepteur. Dans le cas où le transducteur est appliqué au contact de la pièce, l'échogramme (A-Scan) correspond au schéma de la Figure 26. (Krautkraemer, 1990).

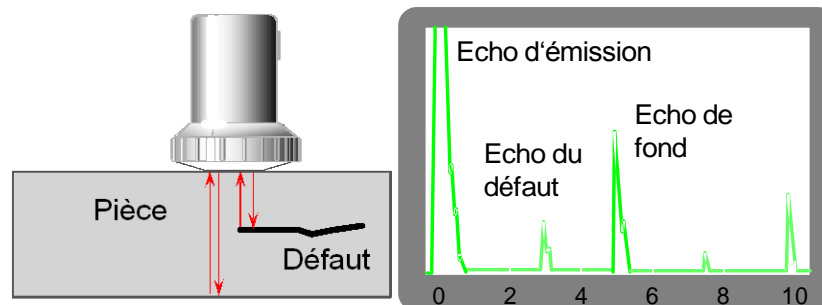


Figure 26: Principe du contrôle ultrasonore par A-Scan (d'après Krautkraemer, 1990).

On excite le transducteur par une forme d'onde. A cela correspond un premier écho sur l'échogramme (écho d'émission). Ce train d'ondes progresse dans la pièce et vient frapper sa face arrière sur laquelle il est réfléchi (écho de fond). En cas de présence d'un défaut dans l'épaisseur, celui-ci réfléchit une partie des ondes incidentes (écho de défaut). La position de l'écho de défaut entre les deux autres échos permet de localiser le défaut dans la profondeur de la pièce. L'amplitude relative des échos d'émission, de défaut et de fond permet d'avoir des indications sur l'importance du défaut.

L'enregistrement d'une série d'échogrammes permet de produire des cartographies de la répartition des défauts soit dans un plan de coupe de la pièce (B-Scan), soit dans un plan perpendiculaire (C-Scan) (Figure 27).

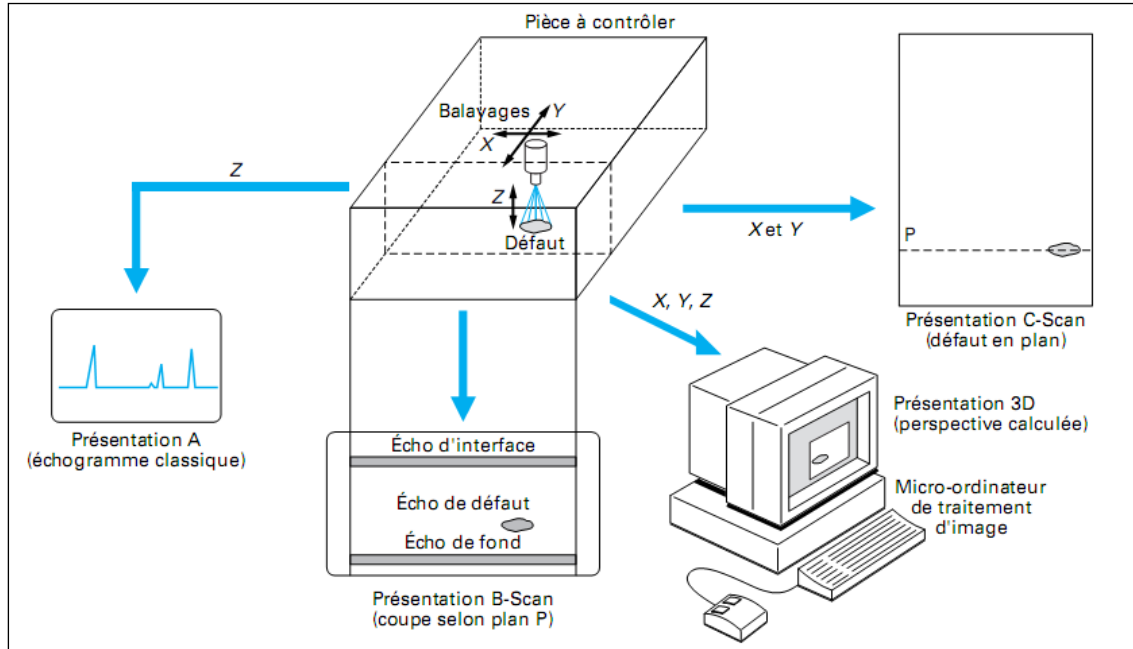


Figure 27: Principe du contrôle ultrasonore par A-Scan, B-Scan et C-Scan (Wanin, 2001).

Dans certains cas, on utilise un second transducteur placé à l'opposé du premier et qui sert uniquement de récepteur. Les impulsions ultrasonores reçues par ce transducteur permettent de caractériser la transmission des ultrasons au travers de la pièce (temps de propagation et atténuation par exemple).

Le contact direct à sec du transducteur sur la pièce n'est pas suffisant pour une bonne transmission des ultrasons : il faut utiliser un agent de couplage tel que l'eau, l'huile ou d'autres produits plus visqueux (graisse utilisée en mécanique automobile par exemple). Il est possible d'utiliser un couplant par élastomère ; cependant, maintenir une pression de contact constante et élevée devient alors un facteur important du contrôle.

L'utilisation de cuves dans lesquelles les pièces sont immergées permet de résoudre de nombreux problèmes. Le couplage est assuré par l'eau additionnée d'agents mouillants de façon à réduire la fixation des bulles d'air. Les transducteurs sont fixés sur des bras manipulateurs permettant une rotation selon plusieurs axes et des translations dans les trois dimensions.

Le contrôle en génération - réception laser existe également pour de nombreuses applications (aéronautique, automobile...). Le contrôle au défilé de produits plats tôles (laminées, plaques) ou longs (profilés, barres, rails...) fait appel soit aux capteurs air-matériau-air (pour de faibles épaisseurs), soit à un couplage par jet d'eau ou encore à une immersion partielle dans une boîte à eau abritant les transducteurs ultra-sonores. (Krautkraemer, 1990 ; Perdijon, 1993 ; Wanin, 2001).

2.6. Imagerie par tomographie en transmission

2.6.1. Principe

Le problème posé par la tomographie est analogue au fait de vouloir retrouver la forme d'un objet à partir d'une série d'ombres projetées (exemple avec un cylindre donné à la Figure 28). En tomographie, ce n'est pas la forme de l'objet mais ses propriétés internes qui sont recherchées. On cherche à obtenir une cartographie bi- ou tridimensionnelle des propriétés. Ces cartographies sont obtenues par résolution d'un problème inverse à partir d'une série de projections équivalente à la série d'ombres projetées pour le cylindre de la Figure 28.

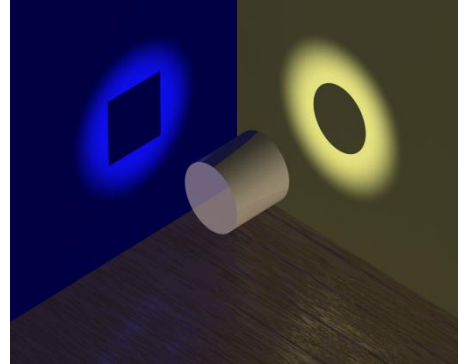


Figure 28 : Illustration du principe de la tomographie.

2.6.2. Problème direct

Une onde traversant un milieu matériel subit un ensemble de transformations. Ces transformations altèrent notamment une propriété notée F de cette onde. Une hypothèse simple consiste à considérer que la transformation résultante F est la somme des transformations élémentaires f au cours de la propagation de l'onde en ligne droite. Cette hypothèse a été formulée par Johann Radon en 1917 (théorème de projection de Radon). Son exploitation pratique a permis la reconstruction d'images médicales en tomodensitométrie à rayon X dès le milieu des années 1960. (Grangeat, 2002).

L'expression mathématique du théorème de Radon entre deux points A et B d'angle θ par rapport à l'axe \vec{x} d'un repère fixe O, \vec{x}, \vec{y} s'écrit :

$$17 \quad F_{AB} = \int_A^B f du$$

Sous sa forme généralisée, la transformée de Radon s'exprime au point (u, θ) par l'équation suivante où $\delta(x)$ est l'impulsion de Dirac.

$$18 \quad F(u, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - u) dx dy$$

La fonction $f(x, y)$ représente la propriété recherchée au point (x, y) du plan traversé. C'est la fonction à reconstruire en tout point de l'espace. Si l'on représente les valeurs F dans un plan d'axes $\vec{u}, \vec{\theta}$ on obtient un sinogramme (Figure 29). Ce sinogramme n'est pas l'image de l'objet, et il n'est pas interprétable directement.

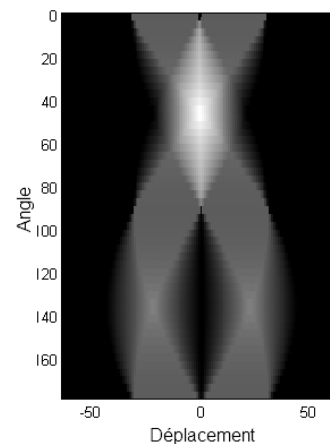


Figure 29 : Exemple de sinogramme.

L'ensemble des projections F sont utilisées pour calculer une image de l'objet. On obtient alors une cartographie $f(x,y)$ solution du problème inverse (inversion de la transformée de Radon). Pour le calcul il faut disposer d'un certain nombre de mesures de F . Le principe de l'acquisition des mesures est illustré à la Figure 30. En faisant varier l'angle θ , on acquiert des projections tout autour de l'objet. (Thiery, 2002).

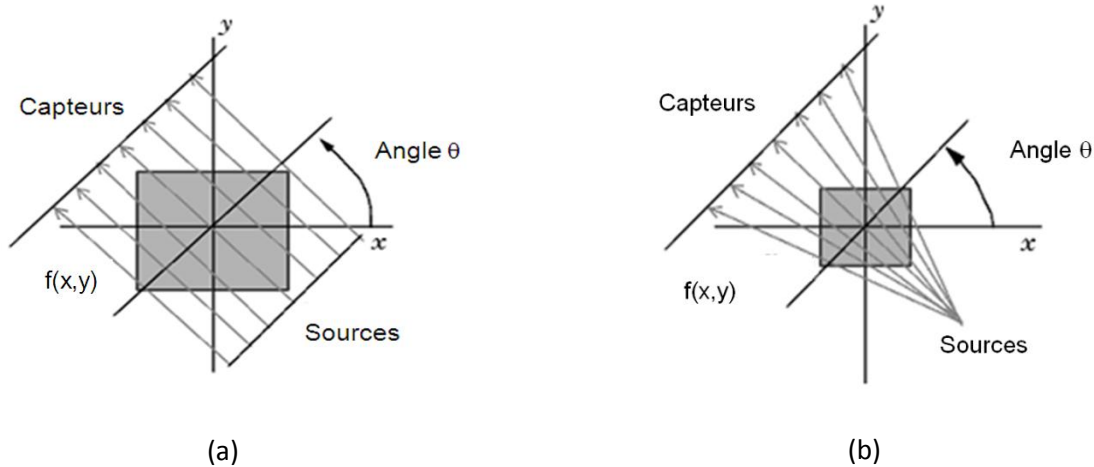


Figure 30 : Acquisition des mesures en géométrie parallèle (a), géométrie en éventail (b).

2.6.3. Problème inverse

A partir d'un ensemble de projections $F(u,\theta)$, l'objectif est de retrouver la valeur de f en tout point de l'espace, c'est-à-dire calculer $f(x,y)$. Une solution pourrait consister à attribuer la valeur $F(u,\theta)$ à tout point placé sur le rayon de projection ayant donné cette valeur. Puis à sommer toutes les contributions issues de toutes les projections. Ce principe est appelé rétroprojection. L'image obtenue n'est cependant pas l'image cherchée f , mais une version floue de f . Cette méthode de reconstruction a un intérêt historique puisque c'est la première méthode à avoir été utilisée (Bloch, 2010).

Il existe une solution analytique exacte qui permet d'obtenir la transformée inverse de Radon. Cette solution est la rétroprojection filtrée. Cependant, les systèmes d'acquisition permettent d'obtenir des projections pour un nombre fini d'angle. Le nombre limité des détecteurs entraîne que ces projections sont échantillonnées et connues simplement en des points discrets. La fonction f est alors reconstruite sur une grille discrète, en un nombre fini de points. Cette fonction est d'autant mieux reconstruite que le nombre d'angles de projection est grand (Figure 31). C'est la limite des algorithmes numériques de reconstruction.

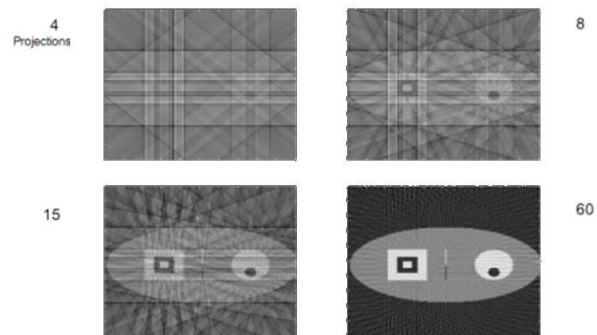


Figure 31 : Effet du nombre de projection sur la reconstruction de la propriété.

Les méthodes de reconstruction discrète de f sont réparties en deux classes (Kak, 1988 ; Bloch, 2010) :

1. La première classe de méthodes consiste à définir les équivalents discrets des opérateurs (transformée de Radon, rétroprojection, transformée de Fourier, etc.) puis à discrétiser les formules d'inversion analytiques.
2. La deuxième classe de méthodes repose sur une approche matricielle (système d'équations linéaires). Dans ce cas, c'est directement l'équation de projection qui est discrétisée, fournissant alors un système d'équations linéaires. La résolution de ce système s'effectue par des méthodes itératives, la résolution directe n'étant pas réalisable. Ces méthodes sont dites algébriques.

Dans le cas des méthodes algébriques, le problème s'exprime sous la forme matricielle suivante :

$$19 \quad F_j = \sum_{i=1}^n R_{ji} f_i \Leftrightarrow \vec{F} = [R] \cdot \vec{f}$$

Avec F : le vecteur des mesures (taille m), chaque composante étant une valeur de projection, f : le vecteur des valeurs recherchées en chaque pixel (f est de taille n), $[R]$: la matrice de projection (taille $m \times n$). Cette matrice ne dépend que de l'acquisition et pas des données (Figure 32). Ses coefficients peuvent donc être calculés une fois pour toute (1 si le rayon j rencontre le pixel i , 0 sinon). La matrice R est creuse, elle n'est pas carrée et elle est mal conditionnée.

Les deux méthodes algébriques les plus utilisées sont ART (algebraic reconstruction method) et SIRT (simultaneous iterative reconstruction technique). La méthode SIRT est une variante améliorée de ART.

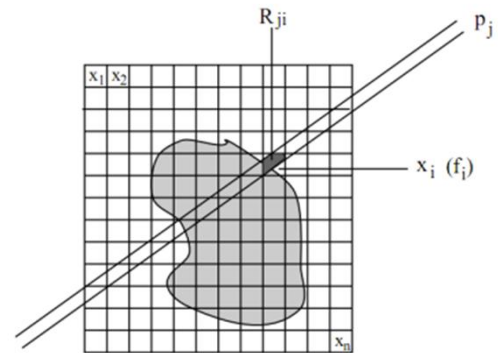


Figure 32 : Géométrie de construction de la matrice de projection pour les méthodes algébriques (Bloch, 2010).

L'équation 19) est en fait une équation de régression linéaire multiple avec F la variable dépendante, R la matrice des variables prédictives et f les coefficients de régression. Toutes les techniques de traitement de la multi-colinéarité peuvent donc être utilisées (régression en composantes principales, régression « Ridge », gradient biconjugué, régression PLS ...). (Saporta, 2006). Le grand intérêt des méthodes algébriques est qu'il est également possible d'inverser le problème dans le cas de rayons courbes.

La modélisation qui précède suppose implicitement qu'un certain nombre d'hypothèses soient vérifiées. Le phénomène physique est imparfaitement modélisé (l'isotropie du matériau implique des rayons acoustiques rectilignes, l'orthotropie implique des rayons courbes). Le rayon doit être infiniment fin ce qui n'est pas le cas en réalité. De plus, ce modèle ne tient pas compte de la dispersion du faisceau et de la diffraction. Il faut également ajouter les incertitudes de positionnement spatial et temporel (qu'est ce qu'un temps de vol ?) ajouté au faible nombre de projection.

2.7. Application au matériau bois

2.7.1. Structure macroscopique

Le bois est un matériau composite multi-échelle d'origine végétal, produit par les arbres vivants (Stevanovic, 2009). Sa structure est cellulaire, poreuse, hiérarchique et présente plusieurs niveaux de structure, chacune bien organisée. Les arbres sont divisés en deux grandes classes : les gymnospermes (résineux ou conifères) et les angiospermes (feuillus). Le plan ligneux (niveau d'organisation anatomique) des résineux est relativement simple et uniforme par rapport à celui des feuillus. (Navi, 2005).

Le tronc d'un arbre est constitué de bois, d'écorce et d'une couche mince située entre le bois et l'écorce, appelée cambium (Figure 33). La fonction de cette couche est de produire les cellules du bois et de l'écorce. On distingue l'aubier (cellules de bois vivantes pour les réserves de substances nutritives situées près du cambium) de la partie interne du bois appelé duramen (cellules mortes). (Navi, 2005). Du fait de sa géométrie quasi-cylindrique et de la présence de rayons ligneux (fonction de réserve et de soutien), il existe trois directions d'anisotropie du bois : l'axe radial R, tangentiel T et longitudinal L. On peut observer les cernes (couche de bois formée au cours de l'année avec une zone initiale et une zone finale en Figure 34) et la moelle (partie centrale) sur le plan transversal perpendiculaire à l'axe longitudinal (Figure 33).

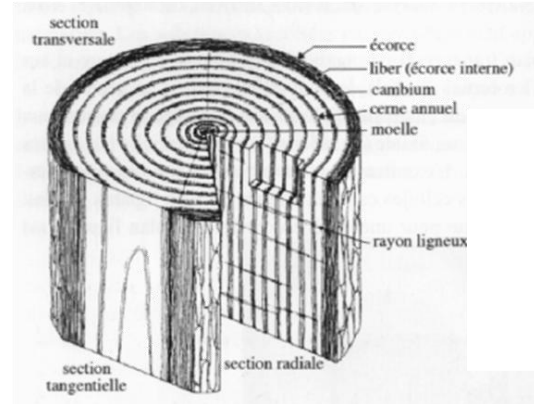


Figure 33 : Représentation schématique d'un bois résineux (épicéa). (Navi, 2005).

2.7.2. Structure microscopique

Dans les arbres, les cellules du bois remplissent plusieurs fonctions comme notamment la conduction de la sève brute de la racine vers les branches, le soutien de l'arbre, la résistance contre le vent et encore la réserve de substances nutritives sous forme d'amidon. Les cellules sont de différentes natures selon leur fonction et selon le type d'arbres (résineux ou feuillus) : fibres trachéides, parenchymes, vaisseaux. Les cellules peuvent être orientées longitudinalement ou radialement (Figure 34).

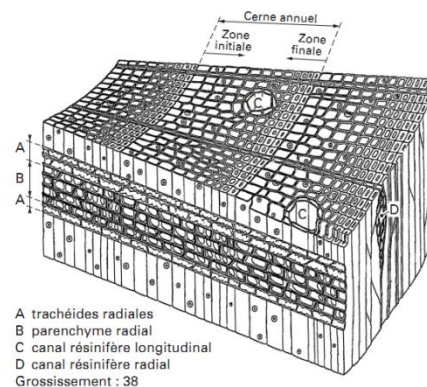


Figure 34 : Exemple d'un plan ligneux de résineux (pin sylvestre). (Trouy-Triboulot, 2001).

Au niveau cellulaire (Figure 35), la couche inter-cellulaire M assure la cohésion des cellules entre elles. Sur cette couche intercellulaire, s'appuie la paroi primaire de chacune des cellules. Sa structure extensible est compatible avec l'élongation de la cellule qui a lieu au moment de la différenciation cellulaire. Vient ensuite la paroi secondaire qui est non extensible. Les parois primaire et secondaire contiennent une armature formée de micro-fibrilles de cellulose, dans une matrice contenant des hémicelluloses et la lignine.

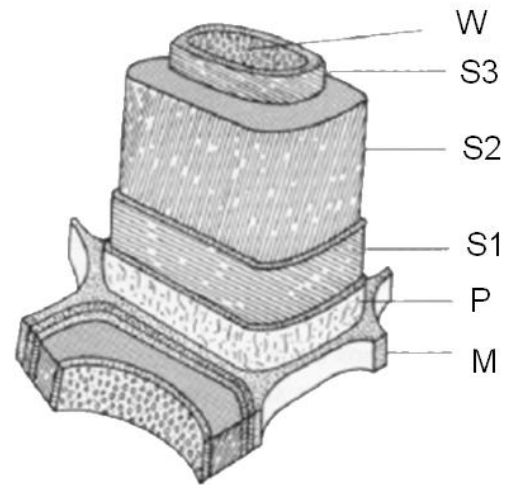


Figure 35 : Représentation des couches constitutives de la paroi cellulaire. M : couche intercellulaire, P : paroi primaire, S : paroi secondaire (S1,S2,S3), W : couche verruqueuse éventuellement présente. (Navi, 2005).

La paroi secondaire est composée de trois couches S1, S2 et S3. La paroi primaire est très mince, elle contient une grande quantité de lignine, mais très peu de cellulose. La paroi S2 est nettement plus épaisse que ses voisines et contribue de manière prépondérante aux propriétés mécaniques et physiques de la paroi cellulaire.

Le faible angle des micro-fibrilles de la paroi S2, compris entre 10° et 30°, contraste avec celui de la paroi S1 compris entre -80° et 80° (selon qu'il s'agit de bois de printemps ou d'été) et celui de la paroi S3 compris entre -70° et 70°. (Trouy-Triboulot, 2001 ; Navi, 2005).

2.7.3. Composition chimique

La composition chimique élémentaire du bois varie suivant les espèces. Pour du bois anhydre, le bois est constitué d'environ 50% de carbone, 42% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% de minéraux. Au niveau moléculaire, le bois est constitué de cellulose (50%), de lignine (20 à 30%) et d'hémicellulose (15 à 25%).

La cellulose est un polysaccharide sous forme de longues chaînes qui offrent des possibilités de liaison hydrogène intra-chaînes et inter-chaînes ce qui confère un haut degré de cristallinité. La cellulose se trouve principalement sous forme de micro-fibrilles dans la paroi secondaire des cellules (Figure 36).

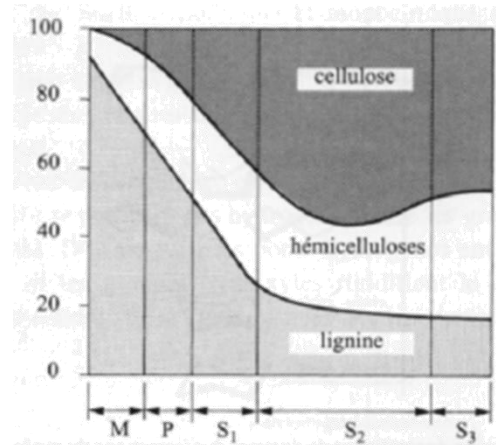


Figure 36 : Distribution en pourcentage des principaux composants moléculaires dans la paroi cellulaire. (Navi, 2005).

Les régions cristallines des micro-fibrilles de cellulose sont interrompues par des régions amorphes (Figure 37). Les micro-fibrilles constituent un renforcement filamentaire principalement de la couche S2 des cellules dans laquelle les micro-fibrilles sont enrobées par une matrice amorphe d'hémicelluloses et de lignine.

Les hémicelluloses sont des polysaccharides à chaînes plus courtes qui constituent une matrice amorphe autour des micro-fibrilles. Elles possèdent des propriétés hydrophiles et sont susceptibles de gonflements importants à relier à la variabilité dimensionnelle du bois (Figure 37).

La liaison intercellulaire est assurée par un polymère amorphe dans lequel dominent les lignines (Figure 37). Les lignines sont des polymères complexes principalement phénoliques. Elles imprègnent la couche inter-cellulaire et la paroi primaire. (Guitard, 1987 ; Navi, 2005).

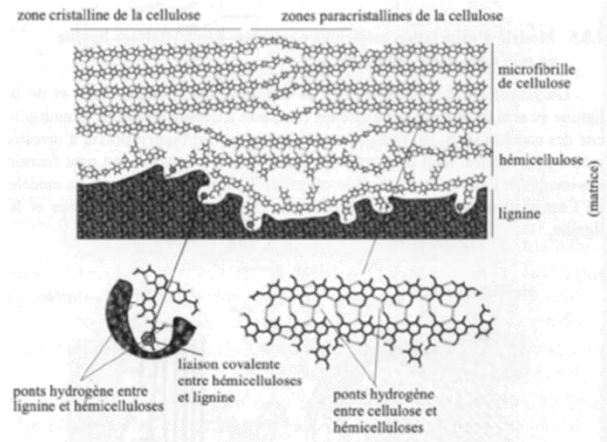


Figure 37 : Modèle d'arrangement moléculaire de la paroi cellulaire à l'état anhydre. (Navi, 2005).

2.7.4. Comportement mécanique

Le matériau bois est assimilable à un matériau composite multicouche (cernes annuels) à géométrie cylindrique. Chaque cerne annuel est assimilable à une structure du type nid d'abeille à fibres unidirectionnelles (organisation cellulaire), perturbé par l'existence de rayons ligneux orientés perpendiculairement. Ces rayons ligneux confèrent au cerne annuel une structure de matériau composite tridimensionnel. Chaque cellule est elle-même assimilable à un matériau composite tridimensionnel multicouche fait de fibres de cellulose enroulées de manière hélicoïdale et noyées dans une matrice. (Guitard, 1987).

L'ensemble des caractéristiques et propriétés physico-mécaniques du bois résulte de cette structure de matériau composite à différentes échelles. Cette structure confère au matériau un caractère orthotrope. Le matériau a trois directions privilégiées (radiale R, tangentielle T et longitudinale L).

Caractéristiques	Feuillus (densité moyenne = 0,65)	Résineux (densité moyenne = 0,45)
Modules d'élasticité (MPa)		
E_L Longitudinal	14 400	13 100
E_R Radial	1 810	1 000
E_T Tangentiel	1 030	636
E_L / E_R	8	13
E_L / E_T	14	21
E_R / E_T	1,8	1,6
Modules de cisaillement (MPa)		
G_{TL}	971	745
G_{LR}	1 260	861
G_{RT}	366	84
G_{LR} / G_{RT}	3,5	8,9
G_{TL} / G_{RT}	2,6	10,3
Coefficients de Poisson		
ν_{RT}	0,67	0,51
ν_{LT}	0,46	0,43
ν_{LR}	0,39	0,39
ν_{TR}	0,38	0,31
ν_{RL}	0,048	0,030
ν_{TL}	0,033	0,020

Tableau 5: Valeurs moyennes des coefficients d'élasticité du matériau bois (humidité théorique de 12%).

La caractérisation complète du bois au sens mécanique repose sur la détermination de 12 coefficients. Le Tableau 5 présente les valeurs 'moyennes' selon la nature de l'arbre et à une humidité théorique de 12%. (Guitard, 1987 ; Trouy-Triboulot, 2001). Ces valeurs ne sont que des ordres de grandeur car le bois étant issu d'un être vivant, il possède des propriétés très variables entre individus mais surtout dans l'individu (de la moelle vers l'écorce et du pied vers la cime).

2.7.5. Effet de la densité, de l'humidité et de la température sur le comportement mécanique

De manière générale les propriétés mécaniques du bois sont liées avec la densité (masse volumique). Certains auteurs ont proposé des modèles statistiques (Tableau 6 et Figure 38). (Bodig, 1973 ; Guitard, 1987).

Module	Valeur des modules (MPa) en fonction de la densité d	
	Feuillus à $H = 12\%$ $0,1 < d < 1,2$ (1)	Résineux à $H = 12\%$ $0,3 < d < 0,6$ (1)
E_L	$= 14\,400 (d / 0,65)^{1,03}$	$= 13\,100 + 41\,700 (d - 0,45)$
E_R	$= 1\,810 (d / 0,65)^{1,3}$	$= 1\,000 + 2\,370 (d - 0,45)$
E_T	$= 1\,030 (d / 0,65)^{1,74}$	$= 636 + 1\,910 (d - 0,45)$
G_{TL}	$= 971 (d / 0,65)^{1,26}$	$= 745 + 989 (d - 0,45)$
G_{LR}	$= 1\,260 (d / 0,65)^{1,14}$	$= 861 + 2\,080 (d - 0,45)$
G_{RT}	$= 366 (d / 0,65)^{1,74}$	$= 83,6 + 228 (d - 0,45)$

(1) Plage de validité des modèles.

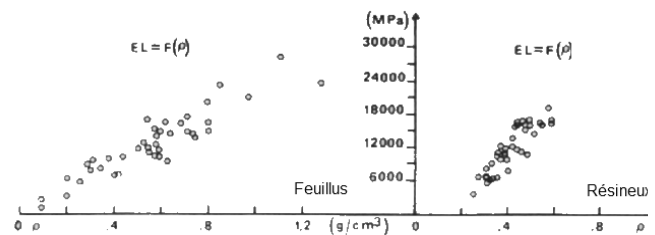


Tableau 6: Modèles statistiques reliant la densité avec les coefficients élastiques. (Guitard, 1987 ; Trouy-Triboulot, 2001).

Figure 38: Exemple de relation entre densité et module d'élasticité longitudinal pour les feuillus et les résineux. (Guitard, 1987).

En fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant, le bois se stabilise à une humidité d'équilibre, dite d'équilibre hygroscopique, qui est indépendante de l'essence. La variation du taux d'humidité (ratio masse d'eau sur la masse de bois anhydre) affecte toutes les propriétés mécaniques du matériau, mais de manière non homogène. Les coefficients élastiques ont tendance à décroître lorsque le taux d'humidité augmente (Figure 39). Au-delà du point de saturation des fibres (environ 30 %), les propriétés physico-mécaniques restent constantes. Pour des variations du taux d'humidité entre 6 % et 20 %, les modèles statistiques du Tableau 7 sont utilisables. (Guitard, 1987).

$E_L^H = E_L^{12} [1 - 0,015(H - 12)]$	$G_{RT}^H = G_{RT}^{12} [1 - 0,030(H - 12)]$
$E_R^H = E_R^{12} [1 - 0,030(H - 12)]$	$G_{TL}^H = G_{TL}^{12} [1 - 0,030(H - 12)]$
$E_T^H = E_T^{12} [1 - 0,030(H - 12)]$	$G_{LR}^H = G_{LR}^{12} [1 - 0,030(H - 12)]$

Tableau 7: Modèles statistiques reliant le taux d'humidité avec les coefficients élastiques. (Guitard, 1987 ; Trouy-Triboulot, 2001).

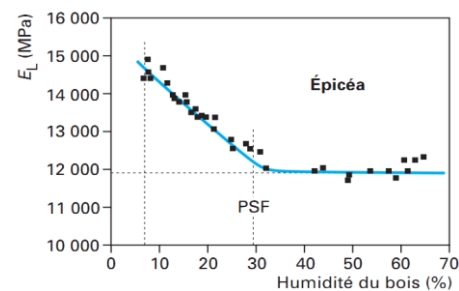


Figure 39: Exemple de relation entre taux d'humidité et module d'élasticité longitudinal pour l'épicéa. (Trouy-Triboulot, 2001).

Cette baisse des propriétés mécaniques est liée à la nature des composants polymériques du bois présents dans les parois cellulaires. La lignine, la cellulose et les hémicelluloses voient leurs températures de transition vitreuse baisser avec l'augmentation du taux d'humidité. (Trouy-Triboulot, 2001).

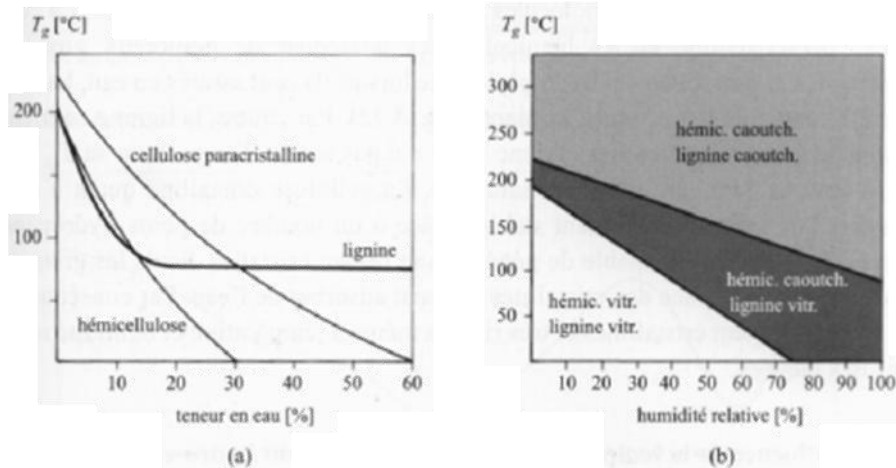


Figure 40 : Température de transition vitreuse des composants isolés en fonction de la teneur en humidité (a) et des composants liés en fonction de l'humidité relative (b). (Navi, 2005).

On notera que la température de transition vitreuse T_g des composants du bois diffère selon que ceux-ci sont isolés ou liés chimiquement. La Figure 40 présente l'évolution de la température de transition vitreuse des composants isolés ou liés. (Navi, 2005). Le ramollissement du bois humide se produit entre 60 et 90°C et il est lié à la transition vitreuse de la lignine, le ramollissement des hémicelluloses ayant peu d'effet sur les propriétés élastiques globales du bois humide. (Stevanovic, 2009).

2.7.6. Paramètres mesurables en acoustique et ultrason

Un essai de vibration en résonance acoustique permet la détermination des fréquences de résonance et des amortissements associés. La Figure 41 présente un résultat obtenu en vibration de flexion sur appuis élastiques. Ce type d'essai permet le calcul des coefficients élastiques du matériau (Kollmann, 1960 ; Hearmon, 1966 ; Pellerin, 2002). Les essais ultrasonores se font généralement en transmission (Figure 42) et permettent la détermination d'un temps de vol (Beall, 2002 ; Tucker, 2003). Une valeur de module d'élasticité est alors déduite du temps de vol en faisant l'hypothèse d'une onde longitudinale non dispersive et en négligeant

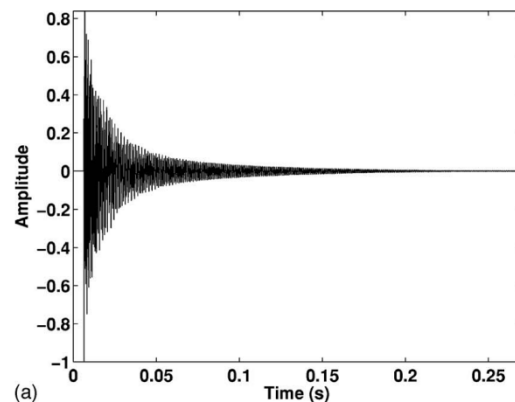


Figure 41-a

les coefficients de Poisson. Pour le bois massif, les vitesses ultrasonores typiques pour des ondes de compression vont de 1000 à 2000 m/s pour les axes R, T et de 5000 à 6000 m/s pour l'axe L. La vitesse radiale R est supérieure à la vitesse tangentielle T. (Beall, 2002 ; Bucur, 2006).

De nombreux travaux ont concerné la détermination du module d'élasticité longitudinal à partir d'un choc sur une poutre en bois (Gerhards, 1982 ; Sobue, 1986 ; Ross et Pellerin, 1988 ; Ohlson, 1992 ; Perstorper, 1993 ; Haines et al., 1996 ; Brancheriau, 2002). Les vibrations analysées sont de type longitudinal ou de type flexion sur des sections rectangulaires ou circulaires.

Un prolongement de ces travaux a consisté à étudier la propagation des ondes acoustiques pour les poteaux ou les billes de bois en relation avec leur résistance (Bulleit, 1985 ; Nilson, 1993 ; Peabody, 1994 ; Ouis 1999).

D'autres méthodes de résonance telles que les vibrations de torsion (Becker, 1968 ; Morze, 1979 ; Olszewski, 1983 ; Nakao, 1985 ; Tominaga, 1990 ; Sobue, 1999) ou les vibrations de plaque ont été étudiées (Nakao, 1985 ; Tonosaki, 1985 ; McIntyre, 1988 ; Molin, 1989 ; Caldersmith, 1990 ; Sobue, 1991).

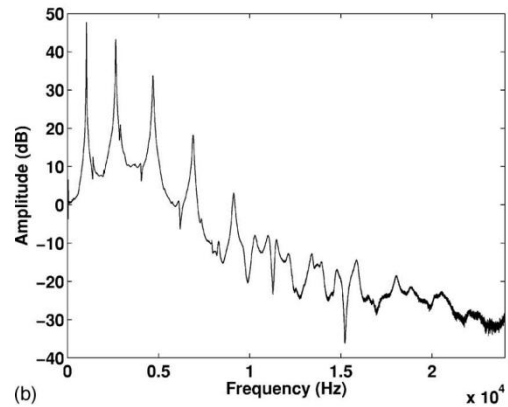


Figure 41 : Exemple de représentation temporelle (a) et fréquentielle (b) d'un essai acoustique en vibration de flexion à plat sur éprouvette de bois (20x45x350mm). (Aramaki, 2007).

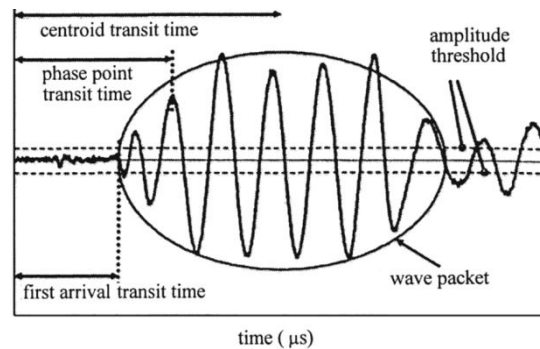


Figure 42 : Schématisation d'une mesure ultrasonore (paquet d'ondes). (Tucker, 2003).

L'essai acoustique le plus utilisé est la vibration longitudinale ou de flexion sur poutre prismatique. En vibration de flexion, deux modèles théoriques peuvent être appliqués : le modèle de Bernoulli (1748) et celui plus complexe de Timoshenko (1921). La solution exacte au modèle de Timoshenko a été proposée par Brancheriau (2002b, 2011). Ces modèles sont valables pour des élancements (ratio longueur sur hauteur fléchie) de 10 pour celui de Timoshenko et de 20 pour celui de Bernoulli (Brancheriau, 2002a). Pour un élancement supérieur à 20, le modèle de Timoshenko tend vers celui de Bernoulli (fréquence fondamentale). L'élancement transverse (ratio base sur hauteur) n'a pratiquement pas d'influence (Brancheriau, 2006).

Pour une petite éprouvette de 20x20x360 mm, l'incertitude sur la détermination du module d'élasticité est de l'ordre de 5% en vibration de flexion (modèle de Bernoulli ou de Timoshenko). Le modèle de Timoshenko permet le calcul d'un module de cisaillement. Sa détermination est optimale pour un élancement de 10, ce qui correspond à une incertitude de l'ordre de 5%. (Brancheriau, 2002a). L'incertitude sur le module d'élasticité longitudinal à partir d'un essai en vibration longitudinal (fréquence fondamentale) est de l'ordre de 3% pour une petite éprouvette. La différence entre une

incertitude en flexion et une incertitude en vibration longitudinale est due au nombre de paramètres nécessaires au calcul. (Brancheriau, 2002b).

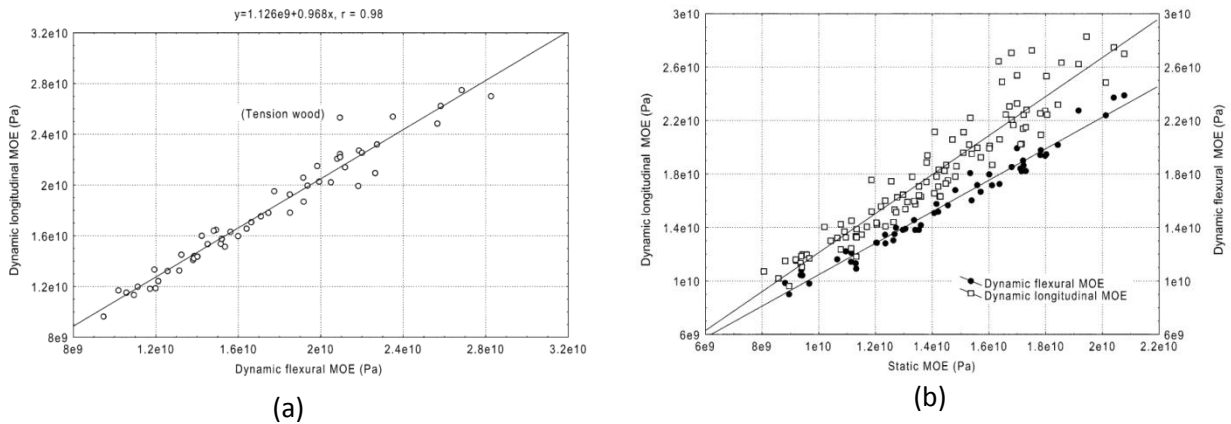


Figure 43 : Module dynamique longitudinal et dynamique de Timoshenko (a), modules dynamiques et statiques (3 points) (b) (20x20x300 mm, *Eucalyptus delegatensis*, N=52). (Ilic, 2001).

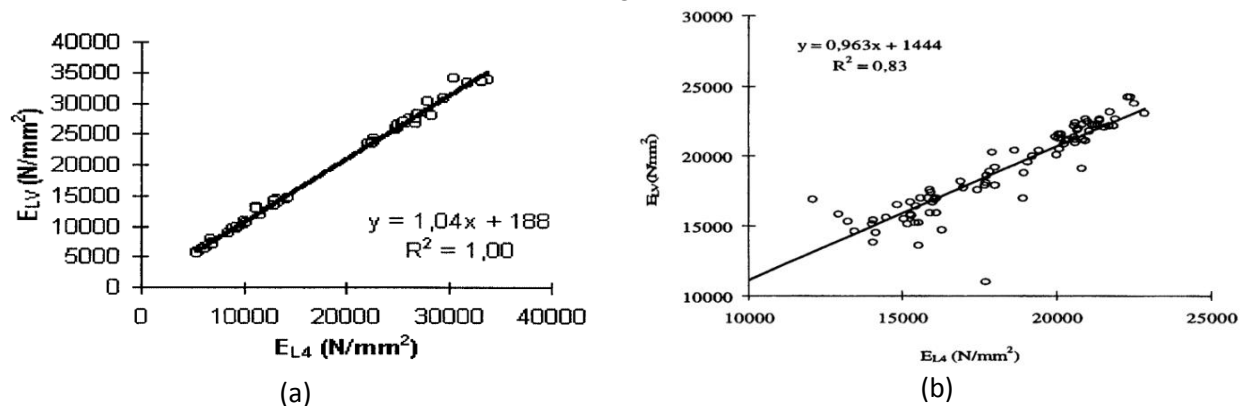


Figure 44 : Module statique local (4 points) et vibration en flexion (Timoshenko) sur petites éprouvettes (a) (20x20x360 mm, bois tropicaux feuillus dans une large gamme de densité, N=54), sur poutres en dimension d'emploi (b) (60x155x3500 mm de *Qualea* spp., N=86). (Brancheriau, 1997).

De nombreux auteurs ont étudié la relation entre module d'élasticité obtenu par un essai statique normalisé et par un essai vibratoire (Haines, 1996 ; Halabe, 1997 ; Ilic, 2001 ; Pellerin, 2002). Vouloir comparer différentes méthodes de mesure est néanmoins un exercice très délicat : les auteurs ne donnent que rarement les incertitudes expérimentales, les normes sont en constante évolution (module de flexion 3 points, module 4 points, module local, module global, module global corrigé par le cisaillement, module local déduit du module global...), d'une manière générale les valeurs moyennes sont étudiées et seule l'équation de régression linéaire est donnée sans information sur l'intervalle de confiance des coefficients.

Haine (1996) a étudié les relations entre modules d'élasticité obtenus par un essai de flexion statique 4 points (module local selon la norme NF B 51-016), par un essai dynamique longitudinal, par un essai dynamique de flexion (Bernoulli) et par un essai ultrasonore en transmission (temps de vol). Le module ultrasonore était supérieur au module de Bernoulli de 20% environ et le module longitudinal était supérieur au module de Bernoulli de 10% (observations effectuées sur 25 éprouvettes d'épicéa et 80 éprouvettes de sapin de 360x20x20 mm). Le module de Bernoulli était supérieur de 2% au module de

flexion statique. Ces variations ont été attribuées en partie à la viscoélasticité (Bodig, 1982 ; Haines, 1996). Des essais ont également été effectués sur 20 poutres d'épicéa en dimension d'emploi (50x150x3000 mm). Ces essais ont montré que le module statique était supérieur de 6% au module de Bernoulli (la distribution de l'erreur n'était cependant pas aléatoire). Une différence de 1% entre module dynamique longitudinal et de Timoshenko a été trouvée par Ilic (2001) (Figure 43-a). Les comparaisons entre l'essai de flexion statique 3 points et les modules dynamiques ont montré une différence de 29% pour le module dynamique longitudinal, 11% pour le module de Bernoulli (Figure 43-b) et 27% pour le module de Timoshenko. La Figure 44 montre les résultats obtenus par Brancheriau (1997). Sur la Figure 44-a, l'ordonnée à l'origine ($y=188$) est statistiquement négligeable. Un test de Student (seuil de 1%) montre que le coefficient directeur est différent de l'unité avec un intervalle de confiance de [1.01, 1.06]. Les mesures vibratoires sont donc supérieures de 4% par rapport aux modules de flexion 4 points. L'écart relatif de 4% reste cependant inférieur aux erreurs expérimentales cumulées de l'essai vibratoire et de l'essai de flexion (5.7% + 6.2%) et le nombre d'échantillons reste modeste. Pour des poutres en dimensions d'emploi (Figure 44-b), le degré de relation statistique diminue ($R^2=0.83$) en raison de l'erreur expérimentale plus forte (de 6.2% à 12% pour l'essai statique) et de la présence d'hétérogénéités naturelles. Des observations expérimentales ci-dessus et des considérations théoriques (Brancheriau, 1997, 2002b), on peut se risquer à ordonner les différents modules obtenus par différents essais (dans certains cas particuliers, ces modules peuvent être égaux) :

$$E_{\text{Statique 3 points}} \approx E_{\text{Statique 4 points (global)}} < E_{\text{Bernoulli}} < E_{\text{Statique 4 points (local)}} < E_{\text{Timoshenko}} < E_{\text{Longitudinal}} < E_{\text{Ultrasons}}$$

Un matériau parfaitement élastique vibrera dans le domaine élastique sans perte d'énergie sauf par frottement éventuel avec l'atmosphère et avec les appuis. En réalité, les matériaux ne présentent pas un comportement aussi idéal et leurs vibrations sont amorties plus vite que ne peut l'expliquer la perte d'énergie due au frottement externe. On appelle frottement interne la propriété intrinsèque que possèdent les matériaux solides soumis à des contraintes cycliques, d'absorber de l'énergie, en transformant l'énergie mécanique en chaleur. Cet effet se manifeste dans le cas des faibles déformations caractéristiques du domaine élastique. (Rivière, 2000). Le frottement interne peut être associé à divers mécanismes, parmi lesquels on distingue :

- Comportement viscoélastique
- Comportement plastique

Le frottement interne par hystérésis dépend de l'amplitude de vibration (hystérésis mécanique en grande déformation), contrairement au comportement viscoélastique (prépondérant dans le cas des petites déformations). Plusieurs paramètres sont utilisés pour décrire l'amortissement dans la gamme des fréquences audibles. Les plus courants sont (Bucur, 2006 ; Brancheriau, 2002b ; Bremaud 2006) :

- L'amortissement temporel α est défini par le coefficient de la décroissance exponentielle de l'enveloppe du signal (12).
- Le décrément logarithmique δ_{Log} désigne la mesure logarithmique de la décroissance périodique entre un intervalle de temps égal à la pulsation naturelle (20).

20

$$\delta_{Log} = \ln \left(\frac{u(t)}{u(t+T)} \right)$$

Avec $u(t)$: déplacement tel que défini par (12) et
 T : pseudo-période.

- Le facteur de qualité (Q) d'un système est une mesure du taux d'amortissement d'un oscillateur. Ce facteur Q permet donc de quantifier la "qualité d'un filtre" : plus Q est élevé, plus le filtre est sélectif (Figure 45). Q peut être défini comme le rapport de la fréquence centrale f_0 à la largeur B de la bande passante à -3 dB.

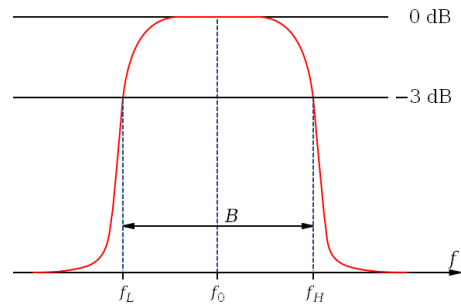


Figure 45 : Réponse fréquentielle d'un filtre passe bande (B : bande passante à -3dB).

Ces grandeurs sont liées entre elles et permettent de déterminer le frottement interne $\tan \delta$ du matériau (21). Le lien théorique entre ces grandeurs n'est pas trivial pour des vibrations de compression ou de flexion, pour le modèle de Bernoulli (Brancheriau, 2010). Le fait que des vibrations de nature différente impliquent une expression identique du frottement doit être souligné.

21

$$\tan \delta = \frac{1}{Q} = \frac{\delta_{Log}}{\pi} = \frac{\alpha}{\pi f_0}$$

D'un point de vue pratique, la détermination du frottement interne est assez délicate. Il faut notamment s'assurer que l'atténuation induite par les supports de l'échantillon (couplage avec le bâti même si ces supports sont placés aux nœuds de vibration du mode fondamental) n'est pas significative par rapport à celle intrinsèque du spécimen (Brancheriau, 2010). Pour cela, il est préférable d'utiliser des supports très souples qui joueront le rôle de filtre passe bas entre l'échantillon et le bâti (ces supports souples augmenteront légèrement la valeur du frottement interne).

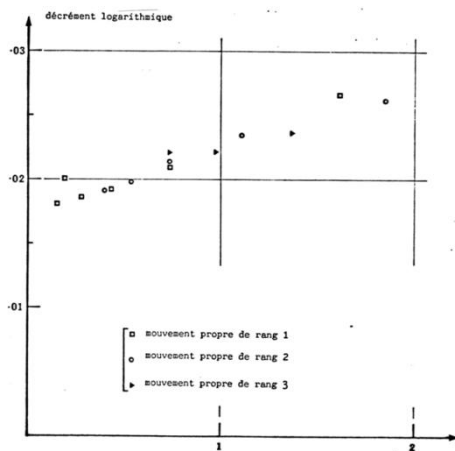


Figure 46 : Evolution du décrément logarithmique en fonction de la fréquence, mesurée en vibrations transversales (*Agathis laureolata*). (Bordonné, 1989).

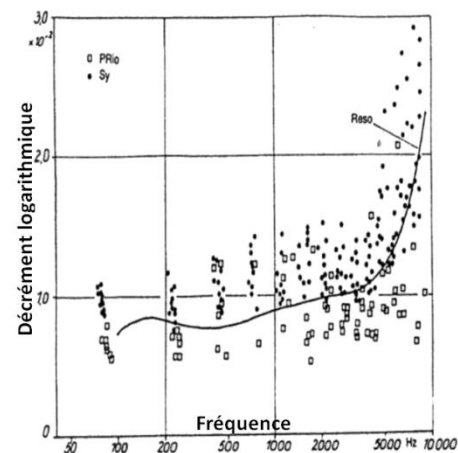


Figure 47 : Evolution du décrément logarithmique en fonction de la fréquence. (Holz, 1996).

L'étude du décrétement logarithmique a notamment été menée par Kollmann (1968), Bordonné (1989), et Holz (1996). Une absence de relation entre la masse volumique et le décrétement logarithmique a été observée expérimentalement par Kollmann (1968) sur du chêne et de l'épicéa, et par Bordonné (1989) sur des essences tropicales. Cependant Bordonné (1989) observe une croissance régulière du décrétement logarithmique avec la fréquence qui lui est associée sur un résineux, le Kaori (Figure 46). Ce type d'évolution a également été observé par Holz (1996) sur de l'épicéa (Figure 47). La Figure 47 montre une évolution régulièrement croissante du décrétement logarithmique en fonction de la fréquence jusqu'à 5 kHz environ où il se produit une inflexion avec une forte augmentation.

Wood species	Specific gravity			Young's modulus (10^{10} dyne/cm ²)			Specific Young's modulus (10^{10} dyne/cm ²)			Internal friction (10^{-3})		
	L	R	T	L	R	T	L	R	T	L	R	T
Sitka spruce (<i>Picea Sitchensis</i>)	0.460	0.449	0.454	12.8	0.909	0.624	27.8	2.02	1.36	11.2	23.2	24.4
Lauan (<i>Pentacme contorta</i>)	0.481	0.489	0.478	11.8	1.38	0.638	24.6	2.82	1.33	7.61	19.7	20.0
Makore (<i>Tieghemella heckelii</i>)	0.669	0.673	0.670	13.6	2.15	1.23	20.4	3.19	1.84	9.50	28.0	33.0
Matoa (<i>Pometia pinnata</i>)	0.795	0.700	0.674	19.4	1.93	1.14	24.5	2.76	1.69	9.38	27.3	27.5
Mizunara (<i>Quercus mongolica</i>)	0.630	0.654	0.620	12.0	1.58	0.969	18.9	2.41	1.56	10.7	25.8	28.9
Yachidamo (<i>Fraxinus mandshurica</i>)	0.570	0.548	0.517	12.8	1.36	0.748	22.1	2.48	1.45	8.89	25.1	26.9

Tableau 8 : Propriétés dynamiques intrinsèques de différents bois (Ono, 1985).

Des valeurs de frottements internes ont été notamment présentées par Haines (1979), Ono (1985) et Brémaud (2011) dans les trois directions L, R, T pour différentes essences. Les valeurs obtenues par Ono (1985) en utilisant le mode longitudinal sont montrées au Tableau 8. Ce tableau montre que le frottement interne dans le sens longitudinal est inférieur à ceux du plan transverse avec un rapport moyen de 2,6 ($\tan \delta_L$ moyen de $9,5 \cdot 10^{-3}$; $\tan \delta_R$ de $24,9 \cdot 10^{-3}$; $\tan \delta_T$ de $26,8 \cdot 10^{-3}$).

Le fait que l'atténuation des vibrations augmente avec la fréquence limite la gamme de fréquence utilisable en ultrason. Beall (2002) indique une limite supérieure comprise entre 100 kHz et 200 kHz pour les matériaux à base de bois. A titre d'exemple, la profondeur maximale de sondage pour une fréquence de 300 kHz ne dépasse pas 10 cm pour du bois sec dans le sens transverse. Pour du bois lamellé-collé dans le sens transverse, un train d'ondes de 30 kHz traverse au mieux 90 cm ; des profondeurs supérieures à 1,2 m peuvent être sondées à 15 kHz. Pour une fréquence de 100 kHz, Beall (2002) donne un ordre de grandeur de l'atténuation dans le sens longitudinal de 30 dB/m et dans le sens transverse de 200 dB/m.

Dans le domaine acoustique et ultrasonore, d'autres paramètres sont mesurables : ce sont des descripteurs du signal. Les descripteurs du signal acoustique sont plus « élaborés » que ceux associés aux signaux ultrasonores car ils sont utilisés notamment pour la synthèse musicale (synthétiseur) et l'étude perceptive (isolation et confort phonique, acoustique musical par exemples). Nous citerons uniquement le format MPEG-7 dont le but est de faciliter l'indexation et la recherche de documents multimédia. Ce

format comprend en particulier des descripteurs audio (encodant le timbre, le spectre, ou des éléments de plus haut niveau comme la mélodie ou la parole) (Kim, 2005).

2.7.7. Effet des propriétés physiques

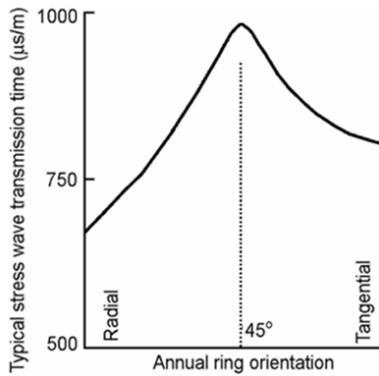


Figure 48 : Temps de propagation des ondes de compression en fonction de l'orientation des cernes d'accroissement (Ross, 1999).

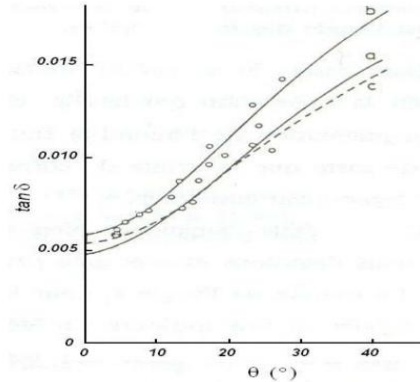


Figure 49 : Influence de l'angle des microfibrilles sur le frottement interne dans le sens longitudinal (Norimoto, 1986).

L'effet de l'orientation des cernes annuels sur la vitesse de propagation et sur l'atténuation est non linéaire. D'une manière générale, les évolutions observées de la vitesse (module dynamique) et de l'atténuation (frottement interne) sont opposées. La Figure 48 montre le temps de transmission des ondes de compression en fonction de l'orientation des cernes (Ross, 1999). Le temps le plus long se trouve à une orientation de 45° (vitesse la plus faible). La vitesse la plus élevée est dans le sens radial (environ 30 % plus rapide que dans le sens tangentiel). L'atténuation est maximale pour une orientation d'environ 45° (Suzuki, 1990 ; Mishiro, 1996). L'atténuation est plus sensible à l'anisotropie du matériau que la vitesse de propagation (Bucur, 1992). La variabilité du comportement acoustique dans la direction longitudinale est en partie attribuée à l'angle des microfibrilles. La Figure 49 montre une augmentation de l'amortissement en fonction de cet angle (Norimoto, 1986). Holz (1967) a de plus observé une influence de la fréquence sur le frottement interne dans la gamme 2-10 kHz (Figure 50) et l'absence d'influence sur le module d'élasticité (la fréquence varie en fonction des dimensions).

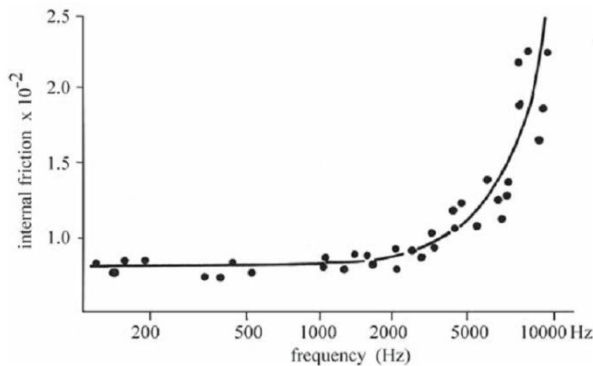


Figure 50 : Evolution du frottement interne en fonction de la fréquence pour de l'épicéa de lutherie (Holz, 1967).

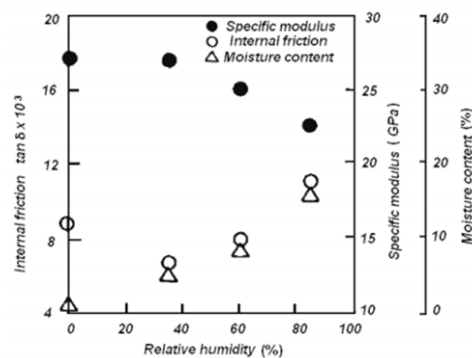


Figure 51 : Relation entre le module spécifique, le frottement interne et le taux d'humidité (Akitsu, 1993).

L'effet du taux d'humidité sur la vitesse de propagation a été étudié par de nombreux chercheurs (notamment Suzuki, 1980 ; Sakai, 1990 ; Akitsu, 1993). La vitesse des ondes acoustiques diminue avec le taux d'humidité jusqu'au point de saturation des fibres. Le frottement interne augmente avec le taux d'humidité à l'inverse du module dynamique et du module spécifique (Figure 51, Figure 52).

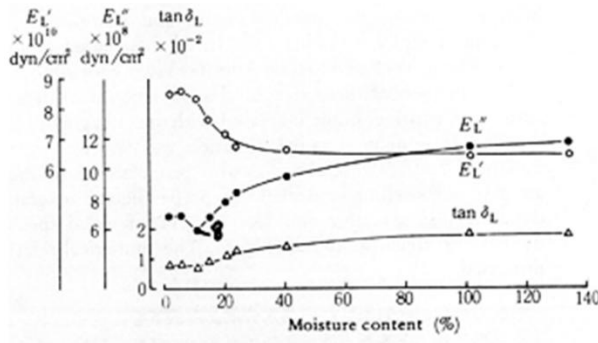


Figure 52 : Effet du taux d'humidité sur le module dynamique (E') et le frottement interne (Suzuki, 1980).

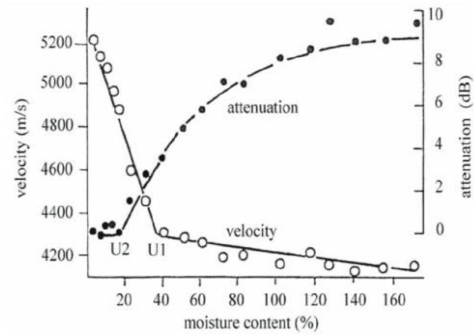


Figure 53 : Vitesse de propagation et atténuation en fonction du taux d'humidité (Sakai, 1990).

Dans l'étude de l'effet du taux d'humidité sur la vitesse de propagation et sur l'atténuation, Sakai (1990) a observé l'existence de deux points d'inflexion différents (U1 et U2, Figure 53). Le point U1 (38%), associé à la vitesse, correspondrait au point de saturation des fibres. La vitesse diminue avec le taux d'humidité jusqu'au point de saturation de fibre (effet combiné de la diminution de la rigidité et de l'augmentation de la masse volumique). Après le point de saturation, la vitesse diminue moins rapidement (seul effet de l'augmentation de masse volumique due à l'augmentation du taux d'humidité). Le point U2 (18%) est associé à l'atténuation et serait lié à la présence d'eau libre à l'intérieur des cellules.

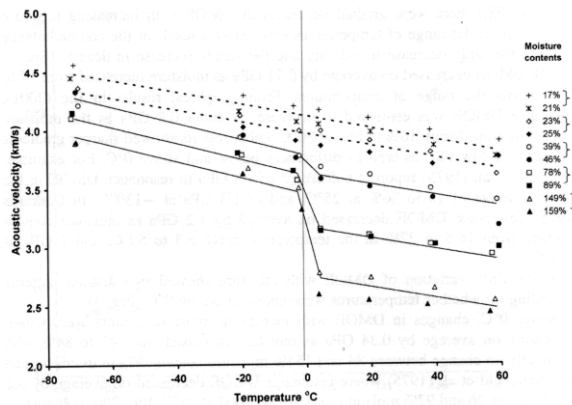


Figure 54 : Variation de la vitesse de propagation en fonction de la température (Chan, 2010).

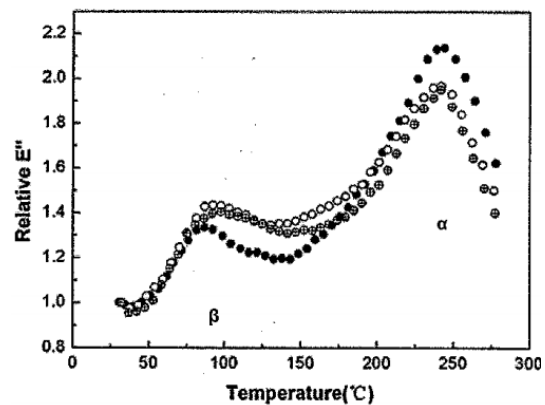


Figure 55 : Effet de la température sur la variation relative du module de perte (Jiang, 2008).

L'effet de la température (de -71°C à $+58^{\circ}\text{C}$) sur la vitesse de propagation a été étudié par Chan (2010). La Figure 54 montre une diminution linéaire de la vitesse avec la température. Cependant, l'effet de la température diffère sensiblement au-dessus du point de saturation des fibres avec une discontinuité au niveau du point de congélation. Jiang (2008) a étudié le comportement viscoélastique du bois (solicitations cycliques de 0,5 Hz à 10 Hz) en fonction de la température sur des échantillons anhydres. Le module de perte croît avec la température et présente deux processus de relaxation à 90°C et 240°C (Figure 55). Il a également été observé que le module de conservation décroît avec l'augmentation de la température de manière non-linéaire (une inflexion significative est située au niveau de α). La relaxation α (240°C) est attribuée à la transition vitreuse de la cellulose. La relaxation β (90°C) est attribuée à la transition vitreuse de la lignine et des hémicelluloses. La température de transition vitreuse de la cellulose varie entre 200 et 250°C . Les transitions des hémicelluloses se situent entre 150 et 220°C . En ce qui concerne les lignines, dans des conditions anhydres, les transitions varient entre 140 et 190°C . Ces valeurs sont cependant très influencées par les procédés d'extractions des polymères et diffèrent de leurs comportements réels in situ. Ces températures de transition sont de plus influencées par le taux d'humidité (les transitions sont plus basses lorsque le taux d'humidité augmente). Ces transitions sont attribuées à la relaxation des molécules d'eau qui forment des liaisons hydrogènes avec des groupements hydroxyles présents dans les polymères structuraux du bois (structure amorphe des hémicelluloses, zones amorphes des microfibrilles de cellulose). Pour un état anhydre, les transitions sont attribuées aux molécules d'eau liées aux polymères structuraux du bois. Pour un état « humide », les transitions sont influencées par les molécules d'eau liées entre elles et organisées autour de la structure ordonnée de la cellulose. (Stevanovic, 2009).

Dans le cas particulier de mesure ultrasonore, le couplage induit la plus grande source de variabilité. Cet effet conduit à considérer les résultats d'atténuation avec une grande prudence (le couplant influera sur l'atténuation et son comportement sera également fonction de la fréquence). La qualité du couplage entre le transducteur et le bois est fonction de la correspondance des impédances acoustiques. Pour les couplages à sec avec élastomère, la pression de contact doit être suffisamment élevée pour limiter la présence d'air à l'interface couplant-bois. Ce type de couplage introduit une perte d'environ 20 dB à 30 dB (à $0,7\text{ kgf/cm}^2$), qui peut être réduite à environ 10 dB lorsque la pression est accentuée (3 kgf/cm^2). (Beall, 2002).

2.7.8. Effet des altérations biologiques

Les altérations biologiques du bois peuvent être dues à des insectes, des térébrants marins ou des champignons. La durabilité des bois est très variable selon les essences. La structure anatomique confère une certaine résistance (ponctuations petites ou thylls empêchant la progression des filaments de champignon, dimension des éléments non adaptée à la biologie de certains insectes). Certains facteurs physiques peuvent intervenir (dureté de l'essence, capacité d'absorption de l'eau) mais aussi chimiques (substances toxiques lors de la transformation de l'aubier en duramen). (Dirol, 2001).

Ce paragraphe traite uniquement des altérations dues aux champignons car très peu de résultats expérimentaux ont pour objet la détection de la présence de cavités d'insectes et de térébrants marins.

Un champignon ne peut se développer qu'en présence de facteurs physiques qui lui conviennent (en plus des éléments nécessaires à sa nutrition). L'humidité et la température sont les facteurs primordiaux. Il existe trois types de pourriture : cubique, fibreuse et molle. La pourriture cubique brune attaque particulièrement le bois de résineux (le bois est découpé en cube rappelant l'aspect du bois calciné). C'est la cellulose qui disparaît et il ne subsiste que la lignine. Le taux d'humidité moyen se situe entre 30% et 50% et la température entre 23°C et 25°C. La pourriture fibreuse blanche attaque plus particulièrement les bois feuillus. La lignine et la cellulose sont dégradées simultanément (bois ramolli, blanchâtre et se décompose en fibrilles). Le taux d'humidité est supérieur à 40% avec une température de 28°C. La pourriture molle attaque plus particulièrement les bois feuillus. La cellulose est dégradée. Le taux d'humidité est d'environ 60% mais la température est variable. (Dirol, 2001).

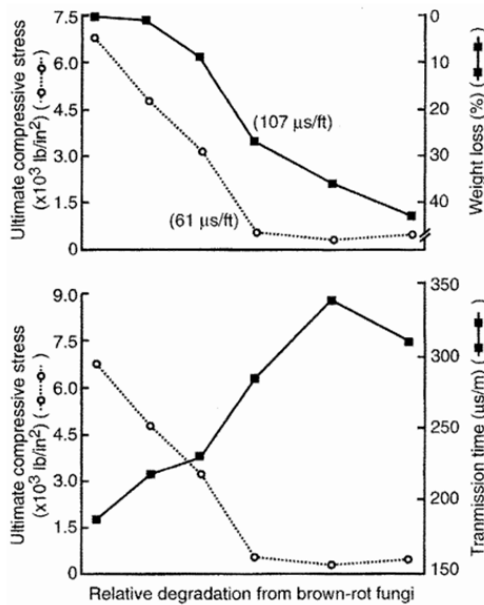


Figure 56 : Relation entre temps de propagation et dégradation fongique (Pellerin, 1985).

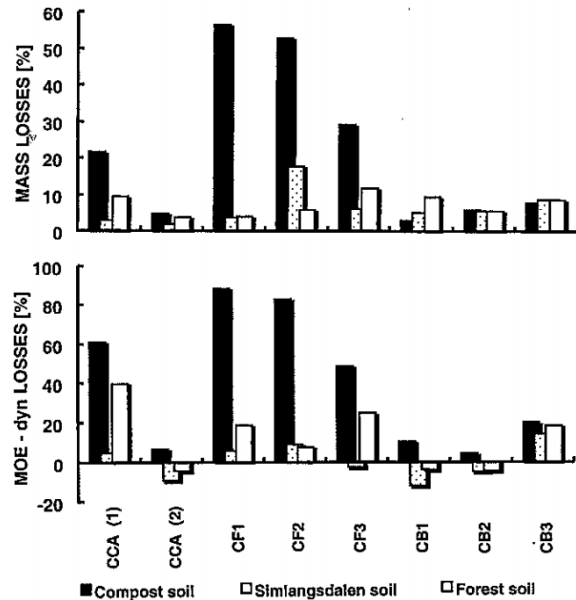


Figure 57 : Effet de différents types de sol sur l'efficacité de traitements de préservation, perte de masse et perte de module dynamique (Machek, 2004).

La relation entre résistance et attaque fongique fait apparaître une perte rapide de la résistance dans les premiers moments suivie d'une diminution plus progressive (Kim, 1994). Machek (2004) a effectué un suivi de la perte de masse et du module d'élasticité déterminé en vibration de flexion. La Figure 57 montre les résultats obtenus après 8 mois d'exposition. Sur cette figure, le module dynamique est plus sensible aux attaques fongiques que la perte de masse (lorsque les pertes de masse sont significatives). La présence d'une attaque fongique diminue la vitesse de propagation des ondes acoustiques. Des vitesses de propagation déterminées pour du Douglas non-dégradé sont de l'ordre de 1250 m/s, tandis que les zones gravement dégradées présentent des valeurs de 300 m/s à 350 m/s (Wang, 2004). Une étude menée par Pellerin (1985) a démontré qu'une augmentation de 30 % du temps de propagation implique une perte de 50 % de la résistance pour une pourriture brune (Figure 56). Dunlop (1983) a observé que la présence de pourriture augmente l'amortissement des ondes acoustiques dans les poteaux.

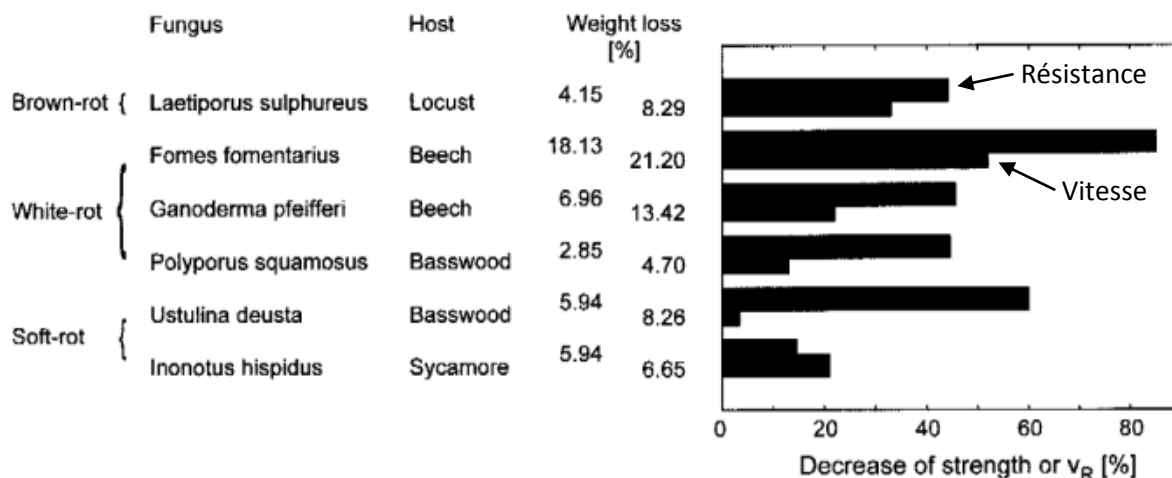


Figure 58 : Diminution de la résistance à la flexion (direction radiale), de la vitesse de propagation et de la perte de masse causées par la décomposition fongique (Schwarze, 1995).

Pour des conditions ambiantes optimales, la dégradation causée par un champignon dépend du type de champignon, de l'essence de bois et de la durée de mise en présence (la norme EN 113 préconise une durée de 4 mois pour les champignons Basidiomycètes – pourriture cubique brune ou fibreuse blanche). La Figure 58 montre l'effet de différentes attaques fongiques pour différentes essences sur la résistance à la flexion et sur la vitesse de propagation radiale (1 mois d'exposition pour la mesure de résistance et 3 mois pour la mesure de vitesse). D'une manière générale, la résistance diminue plus rapidement que la perte de masse et que la vitesse radiale (excepté pour la pourriture molle : *Inonotus hispidus*). La diminution en vitesse de propagation varie entre 13% et 52% (excepté pour la pourriture molle : *Ustulina deusta*). (Schubert, 2007).

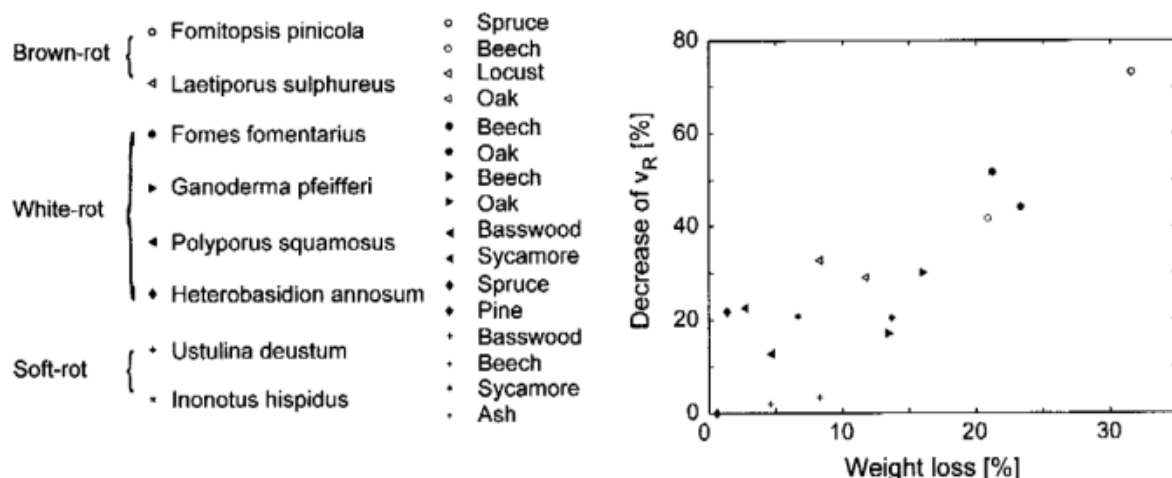


Figure 59 : Diminution relative de la vitesse de propagation fonction de la perte de masse (Schwarze, 1994).

La Figure 59 fait état d'expériences réalisées par le même auteur (Schwarze, 1994). Les vitesses radiales sont également déterminées après 3 mois de mise en présence. Cette figure montre que la perte de

masse et la diminution de la vitesse de propagation radiale sont liées statistiquement. La tendance générale est que la diminution de la vitesse est deux fois plus importante en pourcentage que la perte de masse.

2.7.9. Evaluation non-destructive des arbres sur pied

L'état d'un arbre doit être déterminé en fonction de son utilité (arbre d'ornement, plantation...). L'utilité définit plus largement les moyens de gestion dont font partie les différents types de diagnostic. Les diagnostics peuvent être : physiologique et phytosanitaire (santé, maladie), mécanique (solidité), ontogénique (croissance), paysager (impact visuel) ou financier (valeur). Dans le cas du diagnostic mécanique, l'objectif principal est de savoir si l'arbre présente un danger (risque de rupture) ; il peut également s'agir de sélectionner les individus possédant un fort potentiel mécanique (classement mécanique). Quel que soit le type de diagnostic, une analyse visuelle est toujours nécessaire et permet d'orienter dans le choix d'un outil d'analyse quantitative. Aucune méthode quantitative ne permet de déterminer la dangerosité, seule une estimation d'un risque de rupture est possible. Cette estimation passe par l'emploi et l'interprétation de valeurs quantitatives mesurées par des appareils commerciaux. Les méthodes quantitatives utilisent le carottage, le percement, les ondes mécaniques et les propriétés électriques et électromagnétiques. (Drénou, 2001).

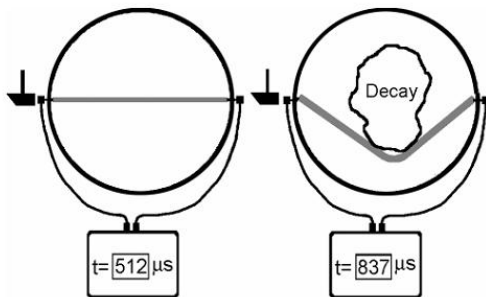


Figure 60 : Principe de la détection de défaut dans les arbres sur pied par mesure du temps de propagation des ondes acoustiques (Wang, 2004).



Figure 61 : Appareil Hitman ST300 (<http://www.fibre-gen.com/st300.html>).

Les techniques acoustiques pour la détection de défaut sont basées sur la mesure de vitesse de propagation. La Figure 60 montre le principe de la mesure. Un marteau instrumenté est utilisé pour générer les ondes mécaniques qui sont enregistrées en sortie par un accéléromètre. Le temps de vol est ensuite déterminé. Les mesures peuvent se faire dans la section transversale ou en longitudinal (Figure 61). Cette technique est ancienne (années cinquante) et il existe un grand nombre de dispositifs commerciaux (la Figure 61 décrit un des dispositifs comme exemple). Il est admis que sur du bois sain la vitesse de propagation est constante pour une essence donnée (un étalonnage essence par essence est nécessaire). Une valeur anormalement basse de la vitesse par rapport à la valeur de référence est interprétée comme résultant de la présence d'un défaut (Figure 60). Wang (2004) donne une liste des valeurs de vitesse obtenues par différents auteurs pour plusieurs essences parallèlement ou perpendiculairement au fil du bois.

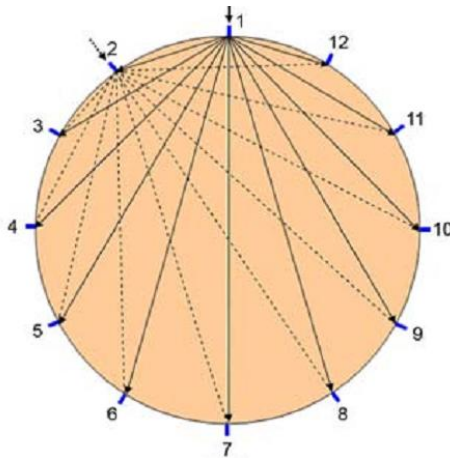


Figure 62 : Disposition des sondes acoustiques pour la tomographie d'un arbre (Wang, 2007).



Figure 63 : Tomographe ArborSonic 3D (<http://www.fakopp.com/>).



Figure 64 : Tomographe Picus (<http://www.argus-electronic.de/>).



Figure 65 : Tomographe Arbotom (<http://www.rinntech.de/>).

Une extension de la technique basée sur la mesure de vitesse de propagation fut le développement de la tomographie acoustique dans les années soixante (Bucur, 2003). La tomographie acoustique des dispositifs commercialisés utilise le même principe que la mesure de vitesse en transmission (Figure 60). L'acquisition des mesures se fait en géométrie éventail (Figure 62). Les principaux tomographes commerciaux sont : "ArborSonic" (Figure 63), "Picus" (Figure 64) et "Arbotom" (Figure 65). "ArborSonic" utilise de 8 à 32 sondes, "Picus" utilise de 5 à 20 sondes, "Arbotom" utilise de 12 à 24 sondes. Ces tomographes ont été utilisés dans la plupart des études publiées (Divos, 2000 ; Rust, 2000 ; Rust et Göcke, 2000 ; Rinn, 2003 ; Rinn, 2004 ; Gilbert, 2004 ; Rabe, 2004 ; Schwarze, 2008 ; Wang, 2007 ; Lili, 2012). Aucune étude n'a comparé les tomographes entre eux sur des objets académiques. Dans d'autres travaux (Nicolotti, 2003 ; Martinis, 2004 ; Socco, 2004), les données furent obtenues en transmission (dispositif Pundit de fréquence 33 kHz) puis inversées par le biais d'un algorithme classique de reconstruction (Kak, 1988). Les résultats obtenus, démontrant la faisabilité de la tomographie par ultrasons, ont été confirmés par des études numériques et expérimentales (Maurer, 2005 ; Schubert,

2007 et 2009). L'effet de l'anisotropie sur la propagation des ondes acoustiques a été mis en valeur par Maurer (2005) et Dikrallah (2006). Maurer (2006) a ensuite proposé une procédure permettant de corriger l'effet d'anisotropie en reconstruction tomographique.

La Figure 66 présente un exemple d'images expérimentales obtenues par Wang (2007). Malgré l'enthousiasme de certains auteurs, cette figure est un exemple des performances des tomographes commerciaux : les images tomographiques possèdent une résolution spatiale beaucoup trop élevée (plusieurs centimètres). L'image est alors « floue » et difficile à interpréter. Les principales causes de ce phénomène sont : le faible nombre de sonde, l'utilisation d'une gamme de fréquence audible et la non-prise en compte de l'anisotropie du matériau. De plus, un seul paramètre, la vitesse, est mesuré. Dans un article récent (Li, 2012), les auteurs ont conclu au « manque de sensibilité » et à la « capacité limitée à détecter des altérations précoces » de ce type de dispositif.

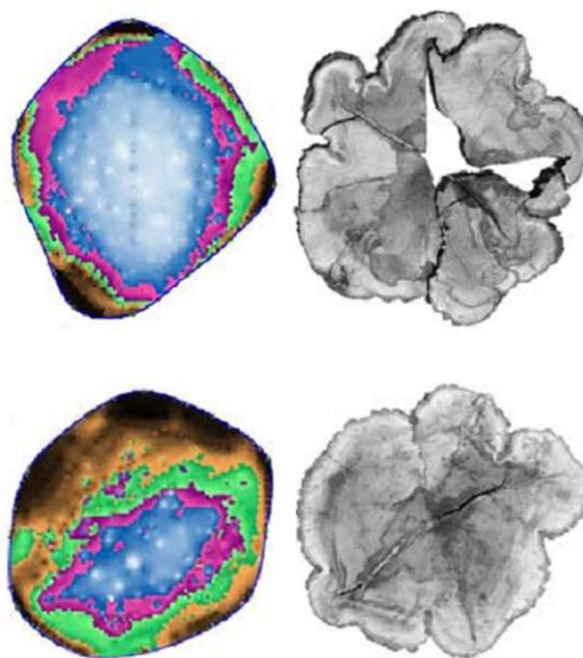


Figure 66 : Comparaison des images tomographiques avec les photographies associées des sections transverses (Wang, 2007).

3. Synthèse des principaux résultats de recherche

3.1. Chronologie des actions de recherche

La Figure 67 présente le détail de mes activités de 2002 à 2011. Chaque activité repérée dans la frise chronologique est développée succinctement par la suite. Le Tableau 9 présente une synthèse par indicateur quantitatif.

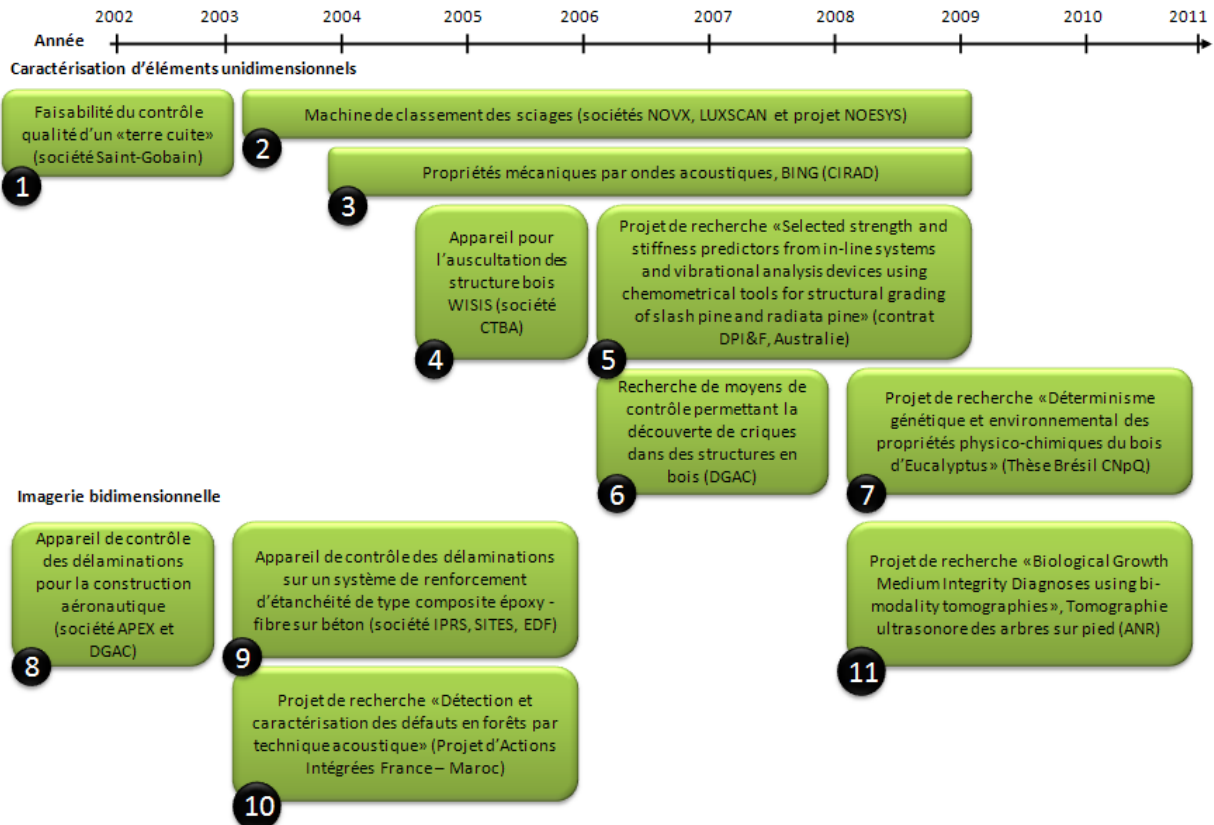


Figure 67 : Chronologie des actions de recherche et développement entre 2002 et 2011.

3.1.1. Caractérisation unidimensionnelle

❶ Etude de faisabilité sur le développement et la calibration d'un processus automatisable de contrôle non destructif de la qualité d'un "produit terre cuite" basé sur l'analyse de la réponse vibratoire dans le domaine acoustique. Cette étude industrielle a été réalisée sur un des sites de la société Saint-Gobain entre 2002 et 2003.

❷ Dès 1995, il avait été observé un regain d'activité au niveau mondial des techniques vibratoires pour le classement des bois (faible coût pour des rendements obtenus équivalents voire meilleurs qu'avec certains autres équipements). Les potentialités des techniques vibratoires avaient été démontrées en France notamment par le programme DERF "Expertise mécanique non destructive de sciages par analyse des vibrations transverses" (Convention N° 01.40.38/98, 1998 – 2001, CTBA / LMA /

CIRAD). Ce programme de recherche avait permis la réalisation d'un prototype de machine de classement (2001 au CTBA). Ce prototype était l'adaptation industrielle du dispositif BING. Plusieurs tentatives de transfert de technologie ont eu lieu en 2003 (société COSYLVA en France) puis en 2004 (société NOVX au Canada). En parallèle, une mise à niveau de la machine de classement industriel (BING Industriel 2004) a été réalisée par l'intermédiaire d'un travail de stage (Jérôme JUSTET, IUP génie mathématique et informatique). Une collaboration pour le développement d'une machine de classement mécanique des sciages a été initiée avec la société LUXSCAN (Luxembourg) en 2006. Cette machine est adaptée aux grandes unités de production (vitesse supérieure à 100 pièces/mn). L'intégration a notamment été accompagnée par l'ENSAM de Cluny et a abouti à la création de la machine E-Scan (homologuée par l'Union Européenne). En parallèle, une action collective pour le développement d'une machine à destination des petites entreprises a été engagée en 2007 par la Chambre de Commerce et d'Industrie de Lozère et l'association interprofessionnelle ARFOBOIS. Ce projet a permis la création de la machine Noesys (homologuée par l'Union Européenne).

③ Un dispositif de caractérisation dynamique avait été développé entre 1986 et 1989 par P.A. Bordonné en thèse au Centre Technique Forestier Tropical (CTFT). Henri Baillères a repris ce dispositif en 1995 lors de la délocalisation du CTFT – CIRAD vers Montpellier. Ce dispositif modernisé entre 1995 et 1998 a été appelé BING (Beam Identification by Non Destructive Grading). En 1999, BING a de nouveau été modernisé (version 2000) pour s'adapter aux progrès de l'informatique. Entre 2004 et 2008 (et encore aujourd'hui...), j'ai développé, avec Sébastien Paradis, la version 9 du produit BING. Les améliorations réalisées ont été les suivantes : (1) Une interface graphique modernisée pour une ergonomie améliorée, (2) De nouvelles sections transverses permettant d'effectuer des mesures sur des échantillons de forme circulaire (pleine ou creuse), rectangulaire (pleine ou creuse), elliptique, en I ou en T, (3) Une carte d'acquisition rapide et autoalimentée par le port USB de l'ordinateur avec également la possibilité d'utiliser toute carte son audio, (4) Une fonction de détection automatique des fréquences de résonance, (5) De nouvelles données et informations proposées en résultat : incertitudes sur les modules d'élasticité (module longitudinal et cisaillement), valeurs d'amortissement associé à toutes les fréquences de résonance (frottement interne du matériau). D'autres extensions sont en cours de développement. Ce dispositif a rendu possible tous les travaux sur la caractérisation des propriétés mécaniques ainsi que les travaux sur l'étude musicale et la perception des sons.

④ Réalisation d'un dispositif pour l'auscultation des éléments de structure bois entre 2005 et 2006. Cet appareil utilise l'analyse temporelle des vibrations dans le domaine acoustique (système WISIS : Wood In Situ InSpection). Il est complémentaire au dispositif BING qui utilise l'analyse fréquentielle des vibrations (spectroscopie de résonance acoustique). Un étudiant a testé le dispositif au CTBA Pôle Construction de Bordeaux (Romain SOUBDE, Ingénieur ENSAM).

⑤ Projet de recherche "Selected strength and stiffness predictors from in-line systems and vibrational analysis devices using chemometrical tools for structural grading of slash pine and radiata pine" entre 2006 et 2009. Projet élaboré par Henri Baillères, l'équipe Xylométrie étant sous contrat avec le DPI&F (Department of Primary Industries & Fisheries). Concernant mes travaux, il s'agissait d'extraire les descripteurs pertinents des signaux acoustiques mais aussi d'exploiter les données des scanners

visuels et rayons X pour le classement mécanique. Les résultats ont été valorisés dans une revue à comité de lecture (BioResources, 2012).

⑥ Etude en partenariat avec le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement ayant pour objet la recherche de moyens de contrôle non destructif permettant la découverte de criques dans des structures en bois (2006-2007). Il s'agissait d'un contrat avec la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC n°06/084/MQ/FIN). Un étudiant a réalisé les essais ultrasonores (Bertrand Ilhe, Master II). Le rapport final a été remis au début de l'année 2008, il est disponible en téléchargement sur le site de la DGAC. Les principaux résultats ont été présentés à l'Académie Internationale des Sciences du Bois (IAWS) en 2008.

⑦ Un projet de thèse a été proposé à la Direction Scientifique du CIRAD en 2008 conjointement par 2 unités de recherche. La préparation de ce projet a mobilisé plusieurs personnes dont Gilles Chaix et moi. L'objectif était d'étudier le déterminisme génétique et environnemental des propriétés physico-chimiques du bois d'Eucalyptus. Ce projet a pour partenaires principaux le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (CNRS, Marseille) et l'Université Universidade Federal de Lavras (UFLA), au Brésil. Ce projet a été refusé par le CIRAD malgré l'accord de financement du CNRS. Il a cependant pu être réalisé grâce au CNPq (équivalent du CNRS au Brésil) ; ce qui a permis à un étudiant brésilien d'effectuer sa thèse au CIRAD (Paulo Hein). Plusieurs disciplines scientifiques ont été abordées pour mener à bien ses travaux et Paulo a publié 9 articles dans des revues à comité de lecture.

3.1.2. Imagerie bidimensionnelle

⑧ Etude industrielle pour la société APEX et la Direction Générale de l'aviation Civile entre 2002 et 2003. L'objectif était de développer une méthode et un appareil de contrôle non destructif des délaminations dans des éléments à base de bois utilisés dans la construction aéronautique. Un appareil a été réalisé et validé dans les ateliers de fabrication. Le personnel a été formé à sa mise en œuvre.

⑨ Etude industrielle avec les sociétés IPRS et SITES relative à la fourniture d'appareils de détection des délaminations sur un système de renforcement d'étanchéité de type composite époxy (2003-2006). Trois appareils de détection ont été réalisés et validés en conditions réelles d'utilisation. Cette étude constitue une valorisation du brevet français n°0112338 (2001, extension PCT en 2003). Ces appareils sont toujours en fonction et sont régulièrement calibrés.

⑩ Réalisation du Projet d'Actions Intégrées France – Maroc PAI MA/03/84 entre 2003 et 2006. Ce projet avait pour objectif la détection et la caractérisation des défauts en forêts de cèdre par tomographie acoustique. Les travaux de thèse d'Adil Dikrallah se sont inscrits dans ce projet (soutenance en 2007). J'ai co-encadré les travaux d'Adil (essais expérimentaux, analyses des résultats et correction du mémoire de thèse). Ce travail a donné lieu à une communication dans un congrès international (COST E35, Italie, 2006) et un article dans une revue à comité de lecture (Comptes Rendus Mécanique, 2010).

II Projet de recherche "Biological Growth Medium Integrity Diagnoses using bi-modality tomographies" (Acronyme BioGMID) entre 2008 et 2011. Ce projet a été retenu dans le cadre du programme blanc de l'ANR. Il avait pour objet la tomographie ultrasonore des arbres sur pied et a constitué la suite des travaux d'Adil Dikrallah. Un informaticien a été recruté en contrat à durée déterminée pour la réalisation du prototype de tomographe ultrasonore (Michaël Krebs, Master en Informatique). Plusieurs étudiants ont également travaillé sur ce projet : Pierre Jozwicki (ingénieur), Ashkan Ghodrati (Master II), Andrès Arciniegas (Master II) et Mohammadali Saadatnia (Thèse). Les résultats obtenus ont été publiés dans 2 articles de revue à comité de lecture (Annals of Forest Science, 2008 ; BioResources, 2011) et ont été présentés dans 4 congrès internationaux avec actes (International Congresses on Ultrasonics, 2007 ; 10th Anglo-French Physical Acoustics Conference, 2011 ; 31th International Symposium on Acoustical Imaging, 2011 ; 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 2011).

Indicateur	Nombre
Article dans des revues à comité de lecture	26
Communication dans des congrès internationaux avec actes	11
Ouvrage et chapitre d'ouvrage	2
Propriété intellectuelle (brevet, marque et logiciel)	5
Logiciel	3
Relecture d'article pour revues à comité de lecture (Acta botanica, Annals Forest Science, Jrl. Wood Science, BioResources, Trees, Holzforschung, Maderas, Jrl. Experimental Botany)	12
Co-encadrement d'étudiants (12)	%
Jérôme JUSTET, IUP	80
Alexandre DIAZ, BTS I	80
Dominique PEYROCHE, Master II	30
Bertrand ILHE, Master II	50
Patrick MARMAROLI, Master II	30
Ashkan GHODRATI, Master II	100
Andrès ARCINIEGAS, Master II	50
Martin FOURNIER, Ingénieur I	100
Romain SOUBDE, Ingénieur III	20
Clément WERNER, Ingénieur III	40
Pierre JOZWICKI, Ingénieur III	20
Loïc BASSECK, Ingénieur I	100
Co-encadrement de thèses (3)	%
Adil DIKRALLAH	80
Mohammadali SAADATNIA	80
Paulo HEIN	30
En Cours (2)	
Andrès ARCINIEGAS	50
Sylvestre Kodjo TONDJO	30

Tableau 9 : Synthèse par des indicateurs quantitatifs des activités de recherche.

3.2. Caractérisation unidimensionnelle

3.2.1. Domaine acoustique

3.2.1.1. Caractérisation mécanique

3.2.1.1.1. Estimation de la contrainte à rupture par spectroscopie acoustique

Ce chapitre présente une illustration des travaux réalisés sur le classement mécanique (point 2 de la Figure 67). Ces travaux ont été publiés dans la revue *Holzforschung* en 2003. Cette étude met en évidence la possibilité de développer un processus de classement mécanique des produits de scierie à usage structurel par analyse des vibrations acoustiques. L'originalité de la méthode consiste en l'utilisation directe du spectre en fréquence comme variable prédictive pour estimer la contrainte à rupture.

L'échantillonnage est constitué d'un lot de 82 poutres de mélèze (3000 x 150 x 50 mm, stabilisé à une humidité théorique de 12 %). Ce lot a été constitué par observation visuelle de manière à avoir des poutres comportant un large éventail de singularités comme des nœuds, des fentes et la présence d'aubier (Figure 68). Des essais de flexion 4 points ont été effectués pour déterminer les valeurs de référence de la contrainte à rupture MOR (EN 408, 1995). Les réponses de vibratoires des poutres à un impact ont été enregistrées en vibrations longitudinales et transversales. Les transformées de Fourier discrètes ont ensuite été calculées et sont utilisées comme variable prédictive de la contrainte à rupture (Tableau 10). Le nombre de prédicteurs dans le modèle statistique est alors de 500.



Figure 68 : Exemple de poutre sélectionnée.

La méthode de régression par les moindres carrés partiels PLS a été utilisée. Il est rappelé que PLS est « apparentée » à la régression linéaire Multiple (MLR) et à la régression en composantes principales (PCR). Cette méthode peut être considérée comme occupant une position mitoyenne entre MLR et PCR. MLR cherche à trouver les coefficients qui estiment le mieux la variable dépendante.

	MOR (MPa)
Nombre	82
Moyenne	41
Ecart type	21
Valeur Min.	7
Valeur Max.	78
COV%	50

Tableau 10 : Statistiques descriptives de la contrainte à rupture.

PCR estime de nouveaux prédicteurs qui « résument » le mieux les informations contenues dans les données expérimentales d'origine. PLS essaie de trouver de nouveaux prédicteurs qui à la fois capturent l'information des prédicteurs d'origine et qui estiment le mieux la variable dépendante. PLS permet alors l'ajustement d'un modèle linéaire avec 82 observations et 500 prédicteurs.

Modèle PLS	N	LV	R ²	SEC (MPa)	IC95 (MPa)	RV
MOR / FFT longitudinale	82	10	0.83	8.6	18	3.4

Tableau 11 : Résultat du modèle de régression PLS. LV : nombre de variable latente, SEP : erreur standard de calibration, IC95 : intervalle de confiance à 95%, RV : ratio de validation (SEP_{Erreur} standard de prédiction / SEC).

Le Tableau 11 et la Figure 69 montrent les résultats d'ajustement obtenus avec la méthode PLS. Le coefficient de détermination est de $R^2=0.83$. Cette valeur est à comparer avec le R^2 de 0.43 obtenu entre contrainte à rupture et module d'élasticité statique. Le module d'élasticité statique est le paramètre connu comme étant le meilleur estimateur de la contrainte à rupture (Glos, 1983). Cette importante différence entre ces 2 modèles s'explique par le fait que la réponse vibratoire est formée par l'interaction de l'ensemble des composantes structurales macroscopiques dont les singularités. Il faut néanmoins remarquer que le ratio de validation est très différent de l'unité, ce qui est caractéristique d'un modèle instable.

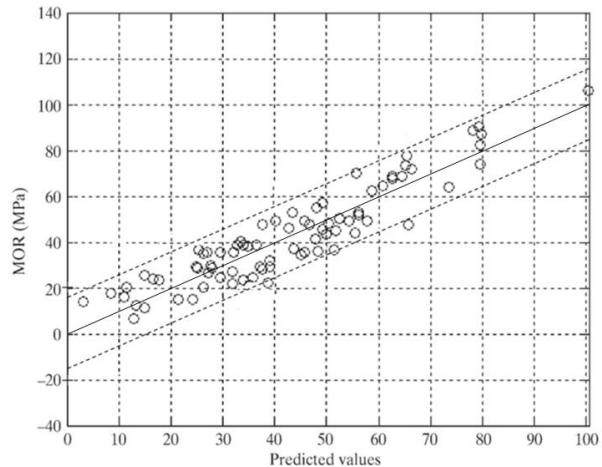


Figure 69 : Relation entre contrainte à rupture MOR et valeur prédite par régression PLS sur la transformée de Fourier des vibrations longitudinales ($R^2=0.83$, $N=82$, nombre de prédicteurs=500).

L'instabilité est due au faible nombre des observations expérimentales et laisse à penser que les performances d'un modèle stable seraient moindres que celles observées dans ce cas. Une application industrielle de ce type de modèle est possible mais nécessite que la transformée de Fourier soit normalisée par les caractéristiques physiques des poutres classées ; sinon le modèle ne serait valable que pour une dimension donnée.

3.2.1.1.2. Détermination des propriétés dynamiques par spectroscopie proche infrarouge

Dans le cadre de sa thèse (point 7 de la Figure 67), nous nous sommes intéressés avec Paulo Hein aux relations existantes entre propriétés dynamiques et absorbance dans le proche infra-rouge. Ces travaux ont été publiés dans la revue *J. Near Infrared Spectroscopy* en 2010. L'étude porte sur 150 arbres hybrides entre *Eucalyptus grandis* et *E. urophylla* âgés de 6 ans. Les arbres font partie d'un plan expérimental aléatoire avec une densité de plantation de 1667 arbres/ha (maillage de 3m x 2m). Un total de 330 échantillons est découpé à partir des plateaux centraux de la bille de pied. Ces échantillons ont pour dimensions 25 mm x 25 mm x 410 mm et sont stabilisés à une humidité d'équilibre de 14%.

Les échantillons sont testés par spectroscopie proche infrarouge SPIR (sur les 2 faces RL au milieu de l'échantillon) et par analyse vibratoire (Figure 70). Les mesures vibratoires sont réalisées en positionnant les échantillons sur des supports très élastiques. Les vibrations sont produites par un impact à une extrémité et enregistrées par un microphone à l'autre extrémité.

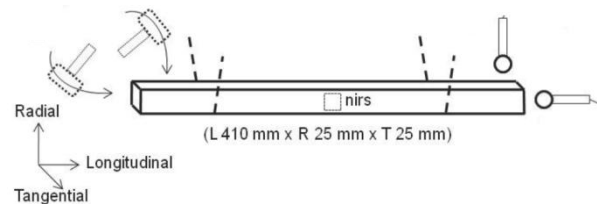


Figure 70 : Protocole expérimental pour les essais vibratoires et de spectrométrie proche infrarouge.

En vibrations transversales, le frottement interne $\tan D_T$ est déterminé à partir de la fréquence fondamentale. En vibrations longitudinales, le module d'élasticité E_L est également déterminé à partir de cette fréquence.

Modèles PLS	N	LV	R ²	SEC	IC95	RV
E_L	327	5	0.78	1130	2200	1.0
$\tan D_T$	147	5	0.49	$0.7 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	1.1

Tableau 12 : Résultats de calibration par méthode PLS entre module d'élasticité E_L , frottement interne $\tan D_T$ et spectroscopie proche infrarouge. LV : nombre de variable latente, SEP : erreur standard de calibration, IC95 : intervalle de confiance à 95%, RV : ratio de validation ($\text{SEP}_{\text{Erreur standard de prédiction}} / \text{SEC}$).

Le Tableau 12 présente les résultats de régression linéaire par méthode PLS pour estimer le module d'élasticité et le frottement interne. Pour les 2 propriétés, les modèles sont significatifs avec un $R^2=0.78$ pour E_L et $R^2=0.49$ pour $\tan D_T$ (Figure 71). Le ratio de validation RV est voisin de l'unité, ce qui indique que les modèles sont stables. Le nombre de points utilisés pour estimer le frottement interne est faible comparé à l'effectif total de la population ($N=147$ pour un effectif de 330 échantillons). La détermination de $\tan D_T$ a en effet été difficile sur ces éprouvettes ; dans de nombreux cas le logiciel Bing indiquait une estimation trop imprécise de ce paramètre. Une non-linéarité est de plus visible sur le graphique de régression de la Figure 71-b.

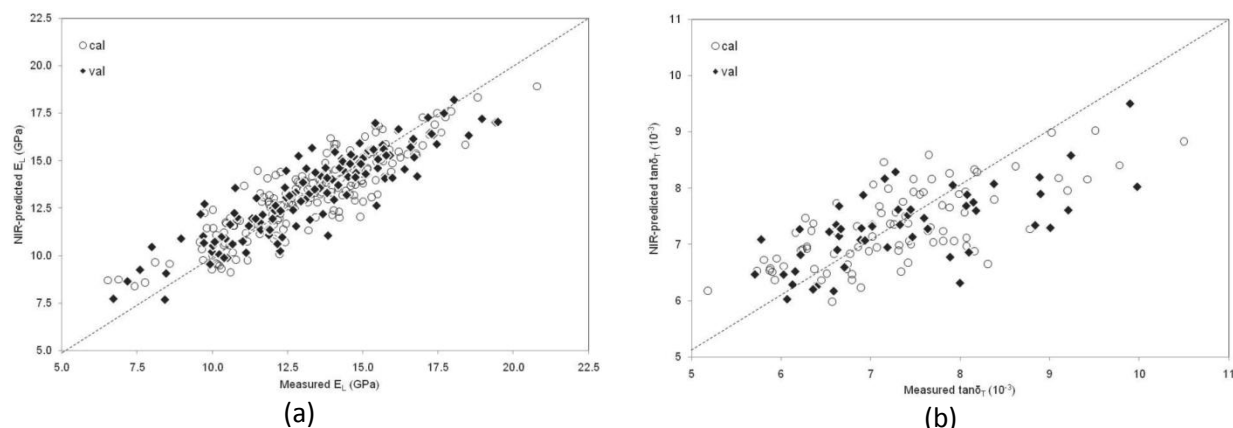


Figure 71 : Modèle SPIR pour (a) le module dynamique ($R^2=0.78$, $N=327$), (b) le frottement interne ($R^2=0.49$, $N=147$).

Dans le cas très particulier de la régression PLS utilisée sur des spectres d'absorbance, il est possible de comparer les amplitudes des coefficients de régression car les variables prédictives (absorbance par nombre d'onde) sont de même nature. Cette comparaison permet de juger de l'importance d'une bande d'absorption par rapport à une autre. Plus la valeur absolue de l'amplitude du coefficient de régression est forte et plus cette variable a du poids dans le modèle. Attention toutefois à centrer et réduire les variables prédictives avant d'effectuer la régression.

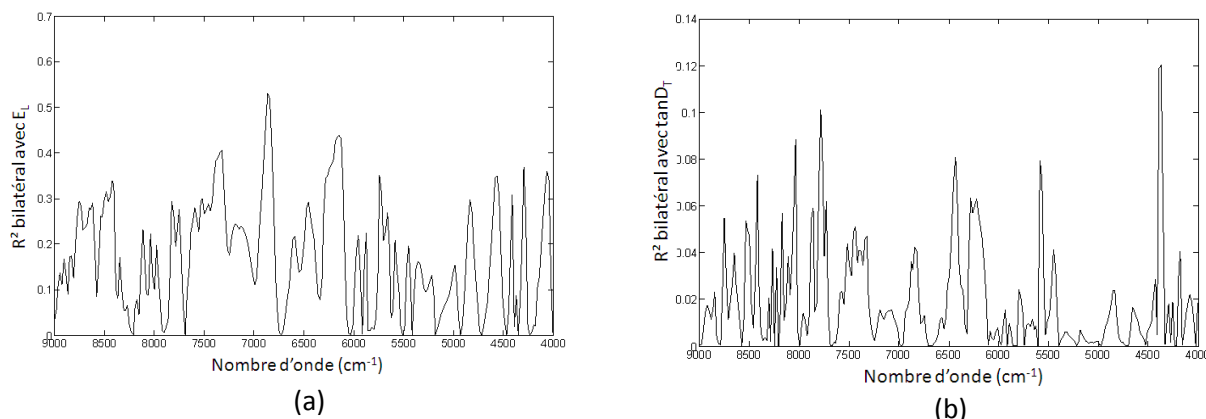


Figure 72 : Lien statistique entre dérivée première du spectre SPIR (centrée-réduite) et (a) module dynamique, (b) frottement interne.

Dans le cas général, il faut étudier le lien statistique entre les variables prédictives et chacune des variables latentes (coefficient de détermination) ou plus simplement étudier le lien statistique entre les variables prédictives et la variable dépendante. C'est ce qui est fait à la Figure 72. Dans le cas du module dynamique, la bande à 6874 cm^{-1} est prédominante. Elle correspond à la lignine (liaison OH intramoléculaire d'après Schwanninger, 2011). Dans le cas du frottement interne, la bande à 4365 cm^{-1} est prédominante (constatation à prendre avec précaution compte tenu du degré de liaison montré sur la figure). Cette bande d'absorption correspond à la cellulose (Schwanninger, 2011). Il s'agit très vraisemblablement des ponts hydrogènes (zones amorphes des microfibrilles de cellulose).

3.2.1.2. Etude et perception des sons musicaux

3.2.1.2.1. Qualité acoustique des lames de xylophone

J'ai participé aux travaux de recherche sur la qualité des lames de xylophones avec mes collègues du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (publication dans le journal AFS en 2006 ; WST en 2006 ; JWS en 2006 ; JASA en 2007) puis plus récemment avec Bakary Traoré (journal AFS en 2010) et Clément Kouchadé (journal JWS en 2010). Le bois est un matériau essentiel pour la fabrication de nombreux instruments de musique. En évaluer les qualités acoustiques relève de la mise en commun de plusieurs domaines de compétence. D'une part, les luthiers apportent un savoir empirique très précieux qui permet le choix des meilleures essences. D'autre part, les connaissances en mécanique et en anatomie du bois permettent une meilleure compréhension de l'origine de ces qualités. Parallèlement, les recherches en synthèse musicale associées aux problématiques de la psychoacoustique donnent un éclairage sur les attributs perceptifs à l'origine de la qualité acoustique d'une essence.

L'étude présentée ici porte sur 58 essences tropicales et se limite aux instruments percussifs de type xylophone. Ces bois ont été choisis afin de couvrir une large gamme de densité allant de 206 à 1277 kg/m³. Deux classifications sont réalisées et mises en parallèle, celle d'un luthier et celle donnée par l'analyse des signaux sonores rayonnés, dans le but d'identifier les paramètres déterminants du signal du point de vue de la qualité acoustique du matériau. Le luthier a effectué la classification de manière indirecte sur la base des sons enregistrés (classification acoustique afin d'éviter une classification multi-sensorielle). Une interface informatique a été conçue pour ce type de classification. Tous les sons, représentés par des icônes identiques, ont été distribués au hasard sur l'écran d'ordinateur. Le luthier pouvait cliquer sur une icône pour écouter un son autant de fois qu'il le souhaitait, et ensuite il a classé les sons en triant les icônes dans l'ordre de qualité acoustique sur l'écran.

Les échantillons ont pour dimensions (préconisées par le luthier) : 350 mm de long, 45 mm de large, 20 mm d'épaisseur (orientation L x R x T). Ils sont posés sur 2 appuis « très » élastiques (afin d'éviter tout couplage avec le bâti support, Figure 73). Un pendule, composé d'un cordon en nylon (30 cm de long) et d'une boule en acier (diamètre 14 mm, poids 12 g), est utilisé pour impacter l'échantillon de manière répétable. Un microphone omnidirectionnel est placé à l'autre extrémité pour mesurer le son rayonné suite à l'impact.

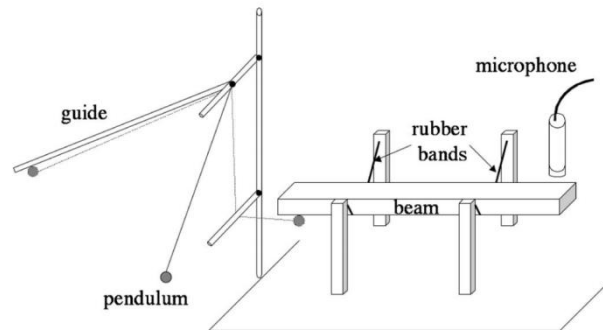


Figure 73 : Schéma du dispositif expérimental.

L'analyse des signaux et des caractéristiques physiques des échantillons a permis d'extraire 14 paramètres :

1. Masse volumique
2. Module d'élasticité longitudinal (EL)
3. Module de cisaillement (GTL)
4. Module d'élasticité spécifique
5. Module de cisaillement spécifique
6. Fréquence fondamentale
7. 1^{er} harmonique
8. Facteur d'harmonicité (HF)
9. Centre de gravité spectral (SCG)
10. Etendue spectrale (SR)
11. Amplitude associée à la fréquence fondamentale (β_1)
12. Amplitude associée au 1^{er} harmonique (β_2)
13. Amortissement temporel de la fréquence fondamentale (α_1)
14. Amortissement temporel du 1^{er} harmonique (α_2)

La matrice de corrélation bivariée (Figure 74) calculée sur la base des 14 paramètres caractéristiques a révélé de fortes colinéarités entre ces paramètres. Une analyse en composantes principales a alors été effectuée. Cette analyse a généré un nouvel ensemble de paramètres (composantes principales). Cinq composantes principales expriment 94 % de la variabilité contenue dans les 14 paramètres originaux.

Une classification hiérarchique a ensuite été effectuée sur la base des composantes principales. La mesure des similitudes entre les individus étudiés est une mesure de distance. Cette mesure de distance est la distance euclidienne calculée dans l'espace orthogonal formé par les cinq composantes principales. La méthode d'agglomération choisie utilise la distance moyenne entre les groupes (ce qui suppose que ces groupes sont quasi-sphériques et bien séparés dans cet espace). Trois groupes ont pu être extraits par la classification hiérarchique (G1, G2 et G3) et comparés aux 3 groupes issus de la classification acoustique du luthier (Tableau 13).

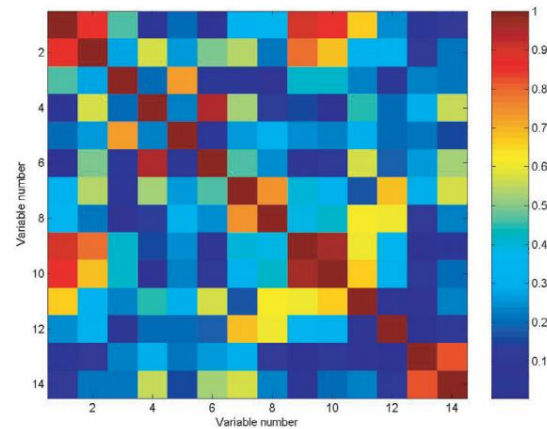


Figure 74 : Valeur absolue de la matrice de corrélation bivariée pour les paramètres caractéristiques.

Effectif	G1	G2	G3
Bon	3	4	0
Moyen	7	16	3
Mauvais	4	7	6

Tableau 13 : Comparaison entre classification acoustique en trois groupes et classification hiérarchique sur composantes principales (matrice de contingence).

Ce tableau indique des différences entre les classifications. Deux hypothèses pourraient expliquer ce manque d'ajustement : soit (1) le luthier a utilisé d'autres informations que les paramètres calculés pour établir sa classification, ou (2) il n'a utilisé qu'une partie des informations contenues dans ces paramètres.

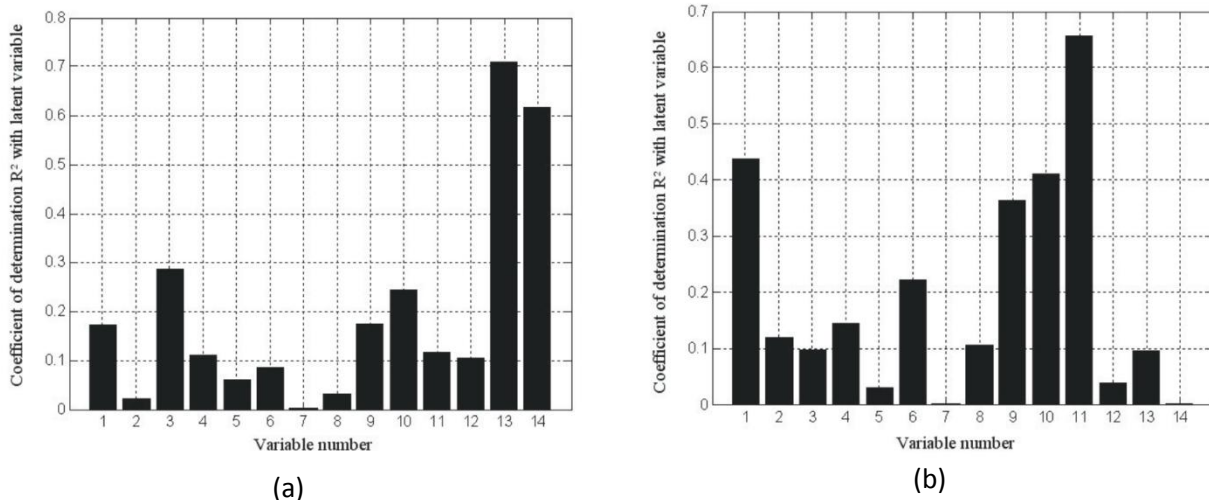


Figure 75 : Coefficient de détermination bilatéral entre paramètres caractéristiques et variable latente 1 (a) et 2 (b).

Un modèle de régression par les moindres carrés partiels (PLS) a été utilisé pour déterminer si l'une ou l'autre de ces hypothèses est vraie. Une distance unitaire entre deux échantillons dans la classification acoustique a été arbitrairement attribuée afin de rendre la variable de classification acoustique quantitative (dans ce cas chaque échantillon est noté de 1 à 58 en fonction de sa qualité). Le modèle de régression PLS obtenu est très significatif ($R^2=0.74$, $N=58$). Les deux variables latentes LV du modèle expliquent à part égale les informations expérimentales (environ 20 % par LV). Cependant, la première LV explique la majeure partie (58 %) de la variabilité dans la classification acoustique du luthier. La Figure 75 montre que la première LV est principalement formée par les variables d'amortissement temporelles (n°13 et 14), qui étaient étroitement corrélées (Figure 74). La deuxième LV est principalement formée par les variables n°1, 9, 10 et 11 (Figure 75). L'amplitude de la fréquence fondamentale (n°11) est la plus fortement liée à LV2, les autres variables (n°1, 9 et 10) sont liées à cette variable latente en raison de leur étroite corrélation avec la variable n°11 (Figure 74). Le choix du luthier est donc principalement influencé par l'amortissement temporel de la fréquence fondamentale et dans une moindre mesure par l'amplitude de cette fréquence.

La relation entre paramètres caractéristiques et classification acoustique du luthier n'est cependant pas linéaire mais sigmoïdale (selon la métrique choisie entre individu, Figure 76). De cette forme particulière on retrouve également les 3 groupes (bon, moyen, mauvais). Une extension du modèle PLS a donc été l'utilisation d'un modèle de régression logistique multiple (publication dans le journal JASA en 2007).

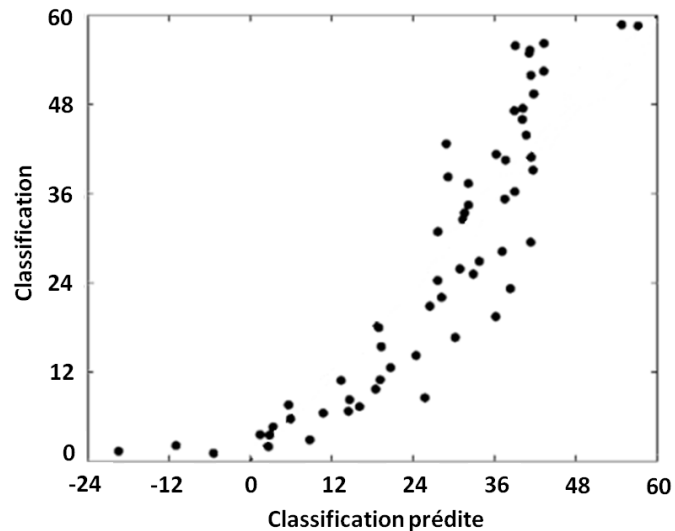


Figure 76 : Relation entre classification du luthier et valeur prédite par modèle linéaire ($R^2=0.77$, $N=59$).

3.2.1.2.2. Catégorisation des sons de matériaux frappés

La caractérisation perceptive des sons de différents matériaux a été abordée au cours du stage de Master de Patrick Marmaroli en 2008. Cette étude a fait l'objet d'une communication au congrès « Computer Music Modeling and Retrieval » cette même année. Je présente dans ce chapitre ma contribution sur l'analyse statistique pour la catégorisation perceptive.

Le signal temporel est la description la plus complète de l'information contenue dans un son. En pratique, il est nécessaire de résumer l'information contenue dans le signal par l'intermédiaire de descripteurs. Dans le cadre de la norme standardisée MPEG-7 (Kim, 2006), une large palette de descripteurs (temporels, spectraux, spectro-temporels) a pu être définie. Ainsi, au travers des calculs de descripteurs, le signal peut être classifié selon des taxonomies pré-définies telles que les genres musicaux (jazz,...), les sons d'environnements (explosion, impact, liquide,...), la parole (conversation...) etc. Les descripteurs *perceptifs* du signal sont utiles pour l'indexation par le contenu de bases de données audio ou multimédia, par exemple avec le e-commerce. Un autre intérêt est celui pour la synthèse sonore : il est plus pertinent de reproduire un son à partir d'un nombre limité de descripteurs perceptifs qu'à partir d'un modèle paramétrique complexe.

L'objectif est ici de proposer une méthode de classification basée sur un nombre réduit de descripteurs perceptifs et non physiques. L'étude est limitée à une classe spécifique de sons d'environnements : les sons d'impacts, et à la classification des différents matériaux perçus (bois, métal ou verre).

Des prises de sons ont été réalisées au format stéréophonique. Des sons de synthèse sont ensuite produits par morphing de manière à créer 15 continua (transition progressive) entre les différents matériaux (5 continua pour chacune des 3 transitions). Chaque continuum est composé de 20 sons hybrides. Les limites entre catégorie ne sont donc pas connues. De plus, en raison de la présence de continua de sons non naturels, il peut exister entre deux catégories une zone de transition. Cette zone est caractérisée par un classement ambigu.

Un test de catégorisation a été effectué sur un groupe de sujets (22 sujets différents pour un total de 300 sons hybrides). Chaque sujet devait classer chaque son suivant le type de matériau perçu : bois, métal ou verre. Les sons étaient présentés dans un ordre aléatoire afin d'éviter que le jugement d'un son n'influence le suivant.

Il s'agit dans un premier temps de définir les limites de chaque catégorie afin d'attribuer à chaque son une appartenance stricte : bois, métal, verre ou zone de transition. L'espace perceptif utilisé pour répondre à ce problème est défini par les trois axes {C1, C2, C3} des pourcentages de réponse bois, métal ou verre. Ces axes ne sont pas orthogonaux (Tableau 14), une analyse en composantes principales ACP est alors effectuée (Tableau 15).

	C1	C2
C2	-0.68*	1
C3	-0.33*	-0.48*

Tableau 14 : Coefficient de corrélation de Pearson (N= 300). * Significatif au risque de 5% (bilatéral).

Component	Eigenvalue	% of Variance
1	1.7	57
2	1.3	43
3	0.0	0

Tableau 15 : Variance expliquée par ACP sur C1, C2 et C3 (N = 300).

Deux composantes principales CP sont extraites. La troisième composante n'ayant pas d'existence (elle est déduite à partir des 2 autres, Tableau 15), l'espace perceptif est alors défini par un plan. Le plan des composantes principales est présenté à la Figure 77.

Dans l'espace perceptif ainsi défini, les sons sont groupés à l'intérieur d'un triangle dont les sommets sont les sons naturels des différents matériaux. Les côtés du triangle devraient contenir, dans le cas d'un discernement non ambigu de catégories semblables, la totalité des sons alignés avec des vides au centre de chaque droite marquant les limites des catégories. La Figure 77 montre les difficultés rencontrées par les individus dans la classification. La transition métal – verre (C2-C3) semble la mieux perçue, les sons étant bien alignés. La transition bois – métal (C1-C2) est la moins bien perçue avec une absence de sons alignés.

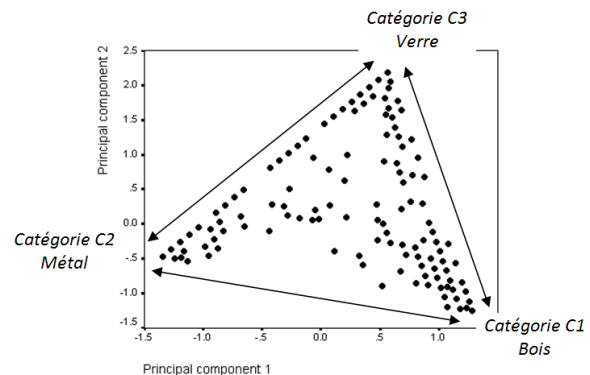


Figure 77 : Espace perceptif défini par les 2 CPs (N = 300).

Il n'est, de plus, pas possible de déterminer les limites des catégories dans l'espace perceptif en raison d'un nombre important de sons éparpillés à l'intérieur du triangle (zone ambiguë).

Afin de déterminer les limites des catégories une classification hiérarchique est réalisée sur les CPs dans une deuxième étape. Les deux CPs définissent complètement l'espace perceptif et sont orthogonales. La mesure de distance utilisée est alors la distance Euclidienne. Le schéma d'agglomération choisi est la méthode du voisin le plus éloigné (complete linkage). Cette méthode est adaptée à la recherche de groupes globuleux de variances inégales et de tailles inégales.

Agglomération Etape	Début	Destination	Ordre Min	Ordre Max	Effectif	Groupe identifié	Catégorie associée
1	bois	verre	14	21	20	A	Verre C3
2	verre	métal	2	9	35	A	Verre C3
3	bois	verre	13	21	9	A	Verre C3
4	verre	métal	2	12	11	A	Verre C3
5	bois	métal	9	12	8	B	Métal C2
6	verre	métal	10	13	4	B	Métal C2
7	bois	métal	10	21	52	B	Métal C2
8	verre	métal	11	21	50	B	Métal C2
9	bois	métal	2	10	23	C	Bois C1
10	bois	verre	2	17	62	C	Bois C1
11	bois	métal	4	11	12	C	Bois C1
12	bois	verre	9	19	6	C	Bois C1

Tableau 16 : Schéma d'agglomération simplifié de la classification hiérarchique (N=292).

Le Tableau 16 présente le schéma d'agglomération simplifié obtenu par classification hiérarchique. Dans ce tableau, 8 sons manquent car leur éloignement ne permet pas une attribution à un des trois groupes (A, B ou C). La procédure d'agglomération identifie en premier un groupe A associé à la catégorie du verre C3 car le verre est l'élément commun des 4 premières étapes d'agglomération. De par la position relative des sons entre eux dans l'espace perceptif, le verre constitue donc la catégorie la plus facilement identifiable. Le groupe B associé au métal C2 est ensuite identifié de l'étape 5 à 8. Le groupe C associé au bois C1 est le dernier groupe identifié (étapes 9 à 12). Le matériau bois constitue donc la catégorie la plus difficilement identifiable.

Les groupes ainsi formés sont utilisés pour attribuer une catégorie bois, métal, verre à chaque son. Il s'agit alors d'estimer l'appartenance d'un son à une catégorie à partir des 8 paramètres quantitatifs descripteurs des sons :

1. TR = Temps de réponse (en millisecondes)
2. CGS = Centre de Gravité Spectral (en Hz)
3. ES = Etendue Spectrale (en Hz)
4. R = Rugosité (en Asper)
5. Att = Atténuation (en dB/sec)
6. D = Durée du son (en sec)
7. AG = Amortissement global
8. AR = Amortissement relatif

Les paramètres AG et AR correspondent aux coefficients de la loi d'amortissement temporel : $\alpha(\omega) = \exp(AG + AR * \omega)$ avec α amortissement temporel (en s^{-1})

Les 8 paramètres sont corrélés entre eux. Trois composantes principales expliquent 79% de la variance totale. La Figure 78 montre le degré de liaison entre les paramètres prédicteurs et les composantes principales. La CP 1 est portée par AG (0.86), ATT (0.74), R (0.44), D (0.36) et AR (0.35). La CP 2 est principalement portée par ES (0.83), CGS (0.67) et D (0.38). La CP 3 est portée essentiellement par TR (0.74) et AR (0.24).

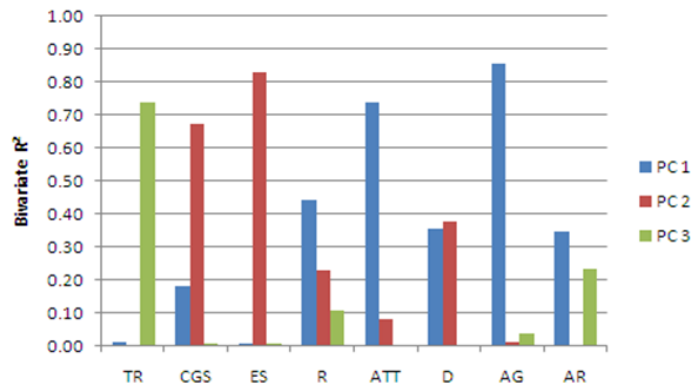


Figure 78 : Coefficient de détermination bivarié entre paramètres et CPs (N=300).

Les variables dépendantes sont qualitatives, elles représentent l'appartenance (Vrai) ou la non-appartenance (Faux) à la catégorie considérée. Afin de construire des modèles statistiques permettant d'estimer au mieux l'appartenance à une catégorie, la régression logistique binaire est utilisée. La méthode de régression logistique multinomiale n'est pas adaptée au problème car les meilleurs estimateurs peuvent être différents d'une catégorie à l'autre. La régression logistique binaire peut être utilisée directement sur les paramètres ou sur les composantes principales. L'utilisation des composantes principales n'est ici pas adaptée car cela sous-entend qu'une grande partie de l'information contenue dans les paramètres est nécessaire à l'estimation. Trois modèles statistiques de régression logistique binaire sont alors construits à partir des paramètres (Tableau 17). Le problème de colinéarité des paramètres est surmonté par une régression de type pas-à-pas (forward stepwise). Au total, 200 sons sont pris en compte par catégorie considérée dans chaque calcul (exemple : la catégorie Métal implique l'exclusion de 100 transitions Bois – Verre).

Catégorie	Variables	Performance (%)
Bois	AG, AR, CGS	95,5%
Métal	AG, ATT	85,0%
Verre	CGS, ES, R, ATT, D, AG	90,5%

Tableau 17 : Modèles de régression logistique binaire pas à pas avec le pourcentage des sons bien classés (le seuil de décision est fixé à 0.5).

La catégorie Métal possède une région très nettement délimitée où les agglomérats de classification sont les plus compacts. C'est une catégorie caractérisée par un modèle possédant le moins de paramètres : AG et ATT. La compacité de la région concernée fait que cette catégorie est la moins bien estimée avec 85% des sons bien classés. Le verre possède le modèle le plus complexe avec 6 paramètres. Le bois est la catégorie la mieux estimée avec 95,5% de sons bien classés. La région de la catégorie Bois est en effet la plus étendue. Les individus ne font pas appel aux mêmes types d'information sonore pour catégoriser les

matériaux. La variable AG semble néanmoins prédominer pour le bois et le métal alors que pour le verre, il semble que ce soit CGS, ES et R.

3.2.2. Domaine ultrasonore

3.2.2.1. Criques de compression dans les assemblages collés

La recherche de moyens de contrôle non destructif permettant la découverte de criques dans les structures bois a été réalisée entre 2006 et 2008 (étude pour la Direction Générale de l'Aviation Civile n°06/084/MQ/FIN, point 6 de la Figure 67). Ces structures bois, en particulier les longerons, font partie de la structure d'avions légers en bois, et notamment d'avions de voltige tel que le CAP10 (Figure 79). Cet avion de voltige constitue la référence de l'étude en raison de la disponibilité d'ailes hors service comportant des criques (il a été construit en de nombreux exemplaires).

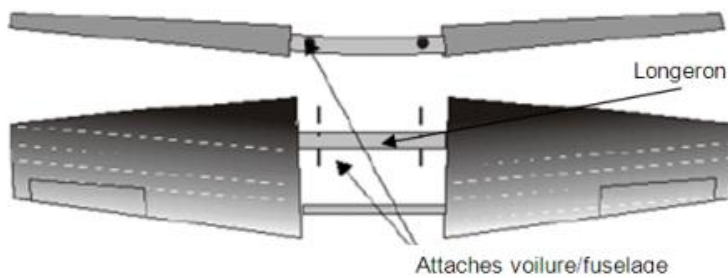


Figure 79 : Schéma d'une voilure monobloc (cas du CAP10).



Figure 80 : Détail d'une crique sur un longeron de CAP231 (photo Air Menuiserie).

La Figure 80 montre le détail d'une crique réelle. La fissuration est visible car noircie par des impuretés. Cette fissuration est provoquée par ruine en compression puis inversion de charge et ouverture au niveau de l'endommagement déjà présent. La présence de traces d'humidité est également visible.

Tous les avions, quels qu'ils soient, sont régulièrement vérifiés. Ces contrôles sont principalement visuels et externes. D'autres visites telles que les "grandes visites" ou "révisions générales" sont plus poussées. Elles nécessitent le démontage de certains éléments de l'avion. L'examen reste cependant visuel et subjectif. Certaines parties de l'avion demeurent des plus inaccessibles et sont donc difficiles à inspecter. L'objectif de cette étude était de proposer un ou plusieurs moyens, non subjectifs et peu coûteux pour la détection. Plusieurs techniques non destructives ont été utilisées (analyse d'image, thermographie infrarouge, rayons X en transmission et diffusion, émission acoustique et ultrasons par couplage avec de l'eau et par contact élastomère). Les résultats ont été présentés au congrès de la Cofrend en 2008 (article disponible sur ndt.net) et à l'IAWS 2008 Annual Meeting.

Ce chapitre présente une synthèse des travaux de Bertrand Ilhe en 2007 au cours de son stage de Master. Les essais ultrasonores (couplage eau, Figure 82) ont été réalisés au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille.

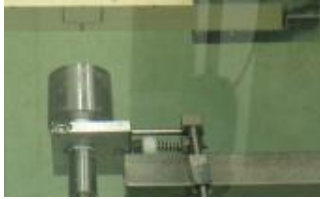


Figure 81 : Détail d'un essai ultrasonore en réflexion normale par couplage avec de l'eau (photo LMA).



Figure 82 : Scanner à ultrasons (photo LMA).

Un élément de longeron a été testé en incidence normale et en incidence oblique de $+20^\circ$ et -20° par rapport à la surface de l'échantillon. Le balayage de l'échantillon suit une trajectoire linéaire de 120 mm de part et d'autre de la zone de crique (Figure 83). Un seul transducteur est utilisé et fonctionne simultanément en émetteur et récepteur. Le transducteur utilisé fonctionne à 1 MHz et focalise à 90 mm. La longueur d'onde associée est de l'ordre de 1 à 5 mm dans le matériau bois (vitesse moyenne de 1500 m/s). Les criques recherchées ont une taille comprise entre 3 et 5 mm environ dans la profondeur. La longueur d'onde utilisée correspond à l'ordre de grandeur de la taille du défaut recherché.

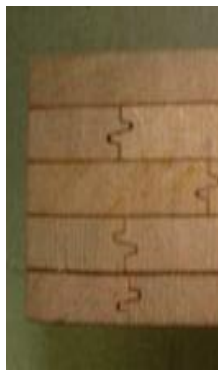


Figure 83 : Élément de longeron de CAP10 testé par ultrasons en cuve (L x l x h = 312 x 156 x 60 mm). Les flèches rouges montrent la zone inspectée.

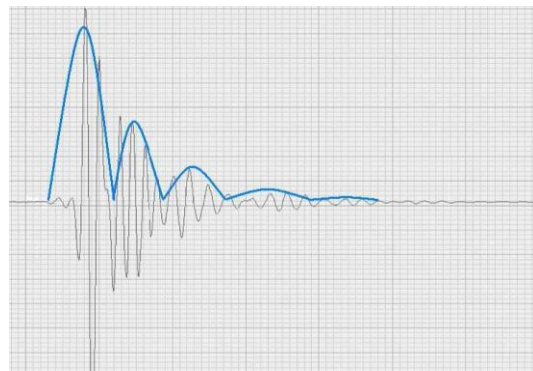


Figure 84 : Représentation d'un essai ultrasonore A-Scan en réflexion normale.

Dans l'exemple de la Figure 84, le signal reçu s'étend sur environ 17 μ s, équivalent à une profondeur contrôlée de 13 mm. L'interface arrière de l'échantillon, interface bois – eau, n'est alors pas discernable. Les interfaces des plans de collage ne se distinguent pas non plus en A-Scan. Cinq paquets d'ondes sont visibles sur l'exemple de cette figure, d'une durée moyenne de 4 μ s (soit 3 mm). Ces paquets semblent correspondre aux réflexions induites par les cernes d'accroissement dont l'épaisseur varie entre 2 et 3 mm.

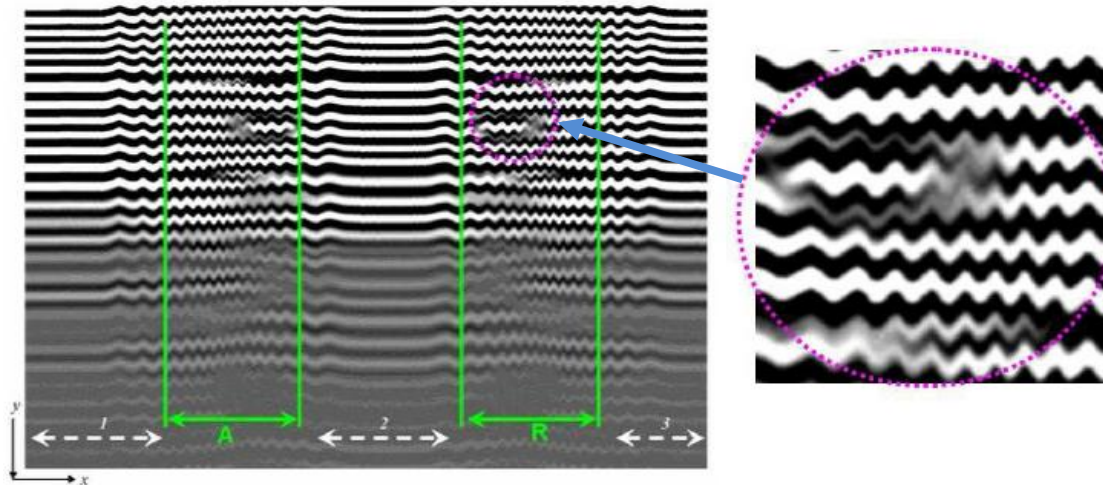


Figure 85 : Représentation B-Scan d'un aller - retour sur une zone de crique (réflexion normale).

La Figure 85 montre un exemple de résultat obtenu par un essai B-Scan en réflexion normale. Sur cette figure, le temps est représenté par l'axe des ordonnées (équivalent à la profondeur de sondage). Le temps écoulé lors de l'essai est représenté par l'axe des abscisses (équivalent à la distance sondée sur la surface de l'échantillon). L'amplitude du signal reçu est représentée en niveau de gris (les signaux ne sont pas redressés). Les zones A et R représentent respectivement l'aller-retour autour de la zone de crique. La zone 1, correspond à l'initialisation de l'essai où la vibration du moteur (accélération et déplacement) est mise en évidence par les oscillations. La zone 2 correspond à la transition ou temps de pause entre les chemins d'aller-retour. Il n'y a aucun mouvement du capteur. La zone 3 correspond au ralentissement et à la fin de l'essai. Les variations visualisées sous forme de vagues correspondent à l'accélération du moteur mise en évidence ici par la vibration de l'échantillon et du capteur lui-même. La zone de couleur bleue sur cette figure qui présente une anomalie (rupture d'impédance acoustique) est une zone comportant un défaut de structure ; une crique de compression dans cet exemple. Connaissant la vitesse de propagation des ultrasons dans le bois, il est possible d'évaluer la profondeur correspondant au défaut (4 mm de profondeur dans ce cas).

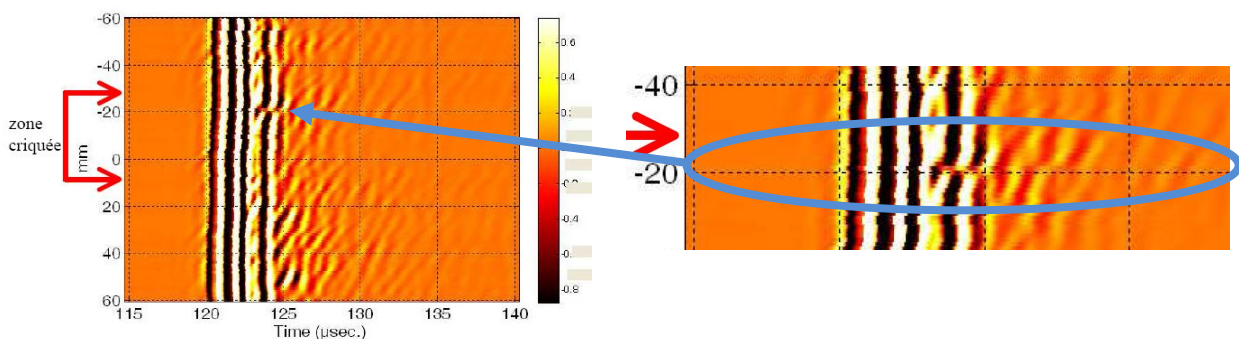


Figure 86 : Cartographie B-Scan obtenue en réflexion normale sur une zone de crique après traitement du signal.

La Figure 86 montre la cartographie B-Scan obtenue après traitement du signal. La zone délimitée par des traits rouges (zone de +10 à -25 mm) montre une rupture de l'image B-Scan par rapport aux zones hors crique apparaissant plus régulières.

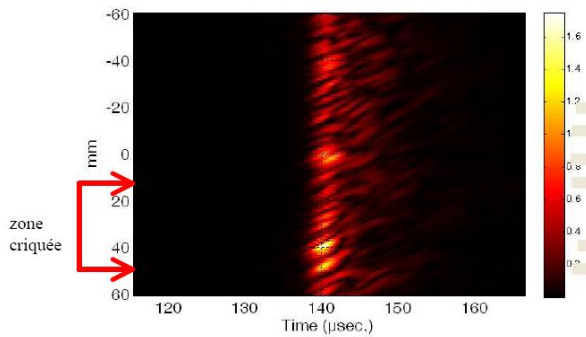


Figure 87 : Cartographie B-Scan de l'élément de longeron obtenue en réflexion sous incidence oblique (+20°).

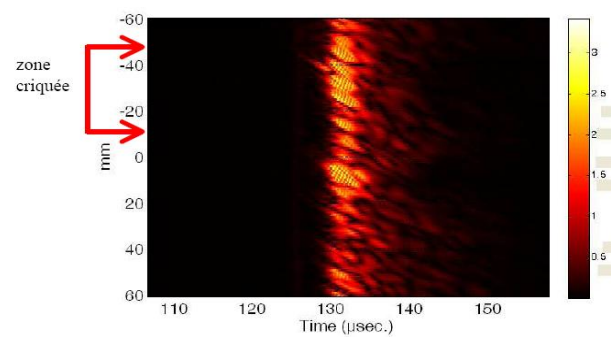


Figure 88 : Cartographie B-Scan de l'élément de longeron obtenue en réflexion sous incidence oblique (-20°).

La Figure 87 et la Figure 88 montrent les cartographies B-Scan obtenues en réflexion sous incidences obliques (+20° et -20°). Compte tenu de l'angle d'incidence donné à la sonde, la zone de crique n'est plus à l'origine du balayage. Comme pour l'essai précédent, les zones fléchées (± 20 à ± 40 mm) montrent une variation de l'image B-Scan (intensification de la dynamique du codage couleur). Il est possible que cette modification de l'écho (absence d'échos spéculaires donc échos relatifs à une propagation dans l'éprouvette, ou à une onde de surface, ou à une onde guidée), reflète une modification plus en profondeur dans l'épaisseur et soit en rapport avec la crique observée dans la même zone. Un sondage optimal serait formé par sondages successifs sous plusieurs angles d'incidence (l'image obtenue n'est pas la même selon l'angle d'incidence de la sonde).

L'analyse ultrasonore permet de mettre en évidence des éléments importants dans le contrôle non destructif de structure composite de type longeron. Sans être capable aujourd'hui de conclure définitivement ou pour un cadre plus industriel (prototypage), l'analyse ultrasonore réalisée présente un intérêt pour la détection des criques en compression. A 1 MHz, en imagerie B-Scan (image de contraste d'impédance), la détection apparaît comme possible en cuve.

3.2.2.2. Détermination des axes principaux d'anisotropie

Dans le cadre du projet de coopération France-Maroc CNRS/CNRST n° 22626 (2009) « Contrôle des paramètres de découpe de la loupe de thuya en vue d'une utilisation rationnelle en marqueterie et en ébénisterie », nous nous sommes intéressés avec Mohammed El Mouridi (en thèse) à la détermination des axes d'anisotropie par essais ultrasonores. Les travaux de Mohammed ont été valorisés par une publication dans le journal Maderas en 2011. Ce chapitre présente uniquement nos travaux communs réalisés en 2009. Il s'agissait alors d'identifier les symétries matérielles de la loupe de thuya, ce matériau particulier n'ayant pas fait l'objet d'étude approfondie de caractérisation physico-mécanique.

Le dispositif expérimental est illustré à la Figure 89. Les essais ultrasonores se font en transmission dans la direction OY* (Figure 90). Les transducteurs ultrasonores ont une fréquence de 1 MHz. L'échantillon est une sphère de 36 mm de diamètre.



Figure 89 : Dispositif expérimental ultrasonore en transmission (couplage par gel).

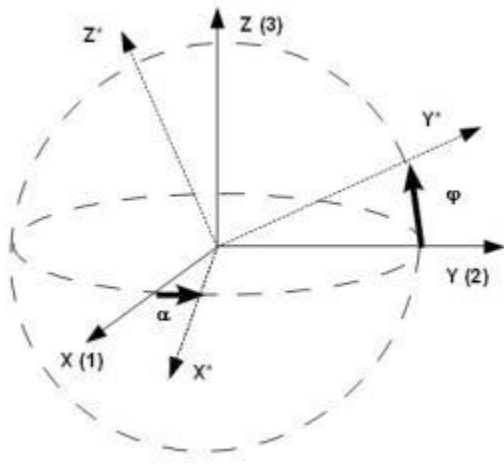


Figure 90 : Schéma du problème géométrique (transmission dans la direction OY*).

Connaissant la matrice de rigidité C du matériau testé, il s'agit de déterminer l'expression de la rigidité en Y^* obtenue lors d'une expérience. Les résultats de la totalité des essais ultrasonores autour de la sphère peuvent ainsi être simulés par le calcul.

Dans ce cas, la sphère est supposée être orientée selon les axes d'orthotropie du matériau. L'équation du problème direct s'obtient par rotation de la matrice de rigidité autour de l'axe Z (d'un angle α) puis autour de l'axe X (d'un angle φ). La troisième rotation des angles d'Euler n'a pas à être prise en compte car seule la direction OY^* est importante ici.

Les deux rotations s'expriment comme suit :

$$22 \quad C^* = P_{X \rightarrow X^*}^\sigma(\varphi) * P_{Z \rightarrow Z^*}^\sigma(\alpha) * C * P_{Z^* \rightarrow Z}^\varepsilon(\alpha) * P_{X^* \rightarrow X}^\varepsilon(\varphi)$$

$$23 \quad C^* = P_{X \rightarrow X^*}^\sigma(\varphi) * P_{Z \rightarrow Z^*}^\sigma(\alpha) * C * P_{Z \rightarrow Z^*}^\varepsilon(-\alpha) * P_{X \rightarrow X^*}^\varepsilon(-\varphi)$$

Avec P : matrice de passage. L'équation obtenue (problème directs selon OY^*) est alors la somme de 6 termes et s'écrit sous la forme matricielle (directions 1, 2, 3 de symétrie matérielle colinéaires aux axes OX, OY, OZ) :

$$24 \quad C_{22}^*(\alpha, \varphi) = A * [C_{11}, C_{22}, C_{33}, (C_{12} + 2.G_{12}), (C_{13} + 2.G_{13}), (C_{23} + 2.G_{23})]^T$$

Dans le cas où la sphère est orientée selon des axes quelconques, le problème direct est résolu de manière numérique. Une première série de rotation (OZ puis OX^*) est effectuée afin d'obtenir une orientation « quelconque » des axes. Une deuxième série de rotation (selon le protocole expérimental) permet ensuite d'obtenir l'ensemble des résultats simulés de l'expérience.

La solution de l'équation matricielle (24) est unique pour un ensemble suffisant d'essais ultrasonores autour de la sphère (supérieur à 6 essais). Elle s'écrit de manière classique par analogie avec la régression linéaire multiple :

$$\overrightarrow{C^S} = (A^T * A)^{-1} * A^T * \overrightarrow{C_{22}^*}(\alpha, \varphi)$$

Avec : $\overrightarrow{C^S} = [C_{11}, C_{22}, C_{33}, (C_{12} + 2.G_{12}), (C_{13} + 2.G_{13}), (C_{23} + 2.G_{23})]^T$

La solution existe si la matrice $A^T A$ est inversible. Cependant, cette solution ne donne accès qu'à 6 données issues de la matrice de rigidité ; ce qui ne permet pas de calculer les 9 composantes.

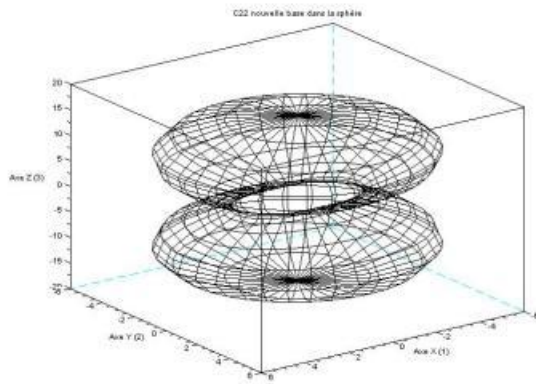


Figure 91 : Valeur de C_{22}^* selon l'orientation Emission – Réception pour le modèle Bois.

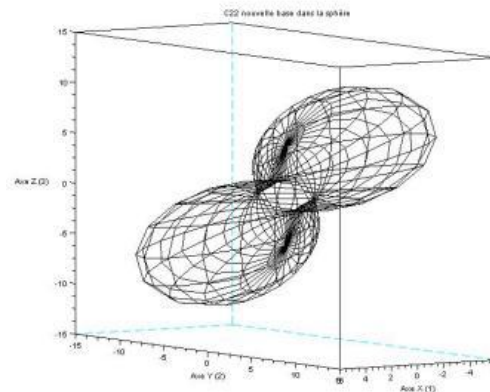


Figure 92 : Valeur de C_{22}^* selon l'orientation Emission – Réception pour le modèle Bois. Sphère préalablement orientée de 30° en α et de 50° en φ .

L'ensemble des résultats d'une expérience ultrasonore est calculé pour un pas angulaire de α et φ égal à 10° . Le problème direct est dans un premier temps résolu pour le modèle bois dans les axes d'orthotropie (Figure 91). Les axes {1, 2, 3} correspondent aux axes {R, T, L} du matériau. Les paramètres d'entrée pour le modèle bois sont les suivants : $E_1 = 2$ GPa, $E_2 = 1$ GPa, $E_3 = 15$ GPa ; $\nu_{12} = 0.67$, $\nu_{13} = 0.057$, $\nu_{23} = 0.033$; $G_{23} = 1$ GPa, $G_{13} = 1.3$ GPa, $G_{12} = 0.4$ GPa ; $M_V = 500$ kg/m³. On obtient alors une forme de 8 tridimensionnelle orientée selon l'axe OZ. La valeur de C_{22}^* varie en fonction de la direction d'émission - réception considérée. Lorsque la direction est celle de OZ (axe longitudinal), la valeur est celle de C_{33} ; la valeur est celle de C_{22} en OY (axe tangentiel) ; la valeur est celle de C_{11} en OX (axe radial).

Dans un deuxième temps, la sphère est supposée être orientée de 30° en α et de 50° en φ avant la réalisation de l'ensemble des essais ultrasonores autour de celle-ci. Les paramètres du matériau sont ceux du modèle bois. Le résultat de la simulation numérique est montré à la Figure 92. Sur cette figure, la forme caractéristique de la Figure 91 se trouve logiquement orientée de 30° en α et de 50° en φ . Une méthode d'identification des axes d'orthotropie d'un matériau consisterait alors à rechercher en premier l'orientation du grand axe (angle φ) ; de réorienter la forme caractéristique par une rotation de $-\varphi$; puis

d'ajuster par une ellipse la coupe associée à la coordonnée ($z=0$). Les trois directions d'orthotropie sont ainsi déterminées.

Le problème inverse se résout lorsque les axes d'orthotropie ont été identifiés et que la sphère est testée en étant orientée selon ses axes. En l'absence d'erreur de mesure, le résultat du problème direct (ensemble des C_{22}^* associés aux angles α et φ) est utilisé dans le problème inverse (équation 25) afin de calculer le vecteur de rigidité d'origine [C_{11} , C_{22} , C_{33} , ($C_{12} + 2 G_{12}$), ($C_{13} + 2 G_{13}$), ($C_{23} + 2 G_{23}$)]. La matrice $A^T A$ est inversible ; dans le cas présent son nombre de conditionnement est de 27. Le vecteur de rigidité calculé est alors identique au vecteur d'origine.

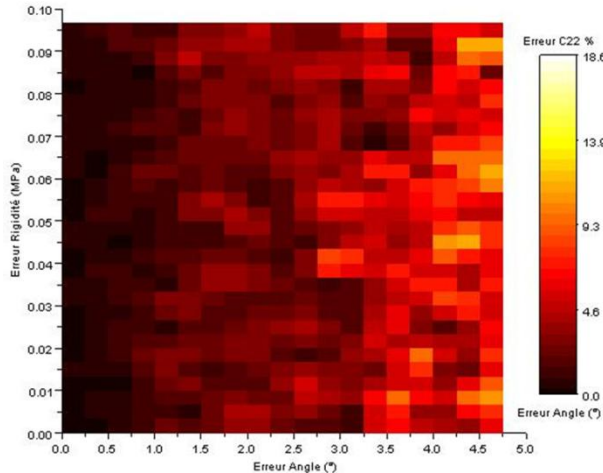


Figure 93 : Sensibilité aux bruits de mesures de la méthode d'inversion associée à la détermination de C_{22} .

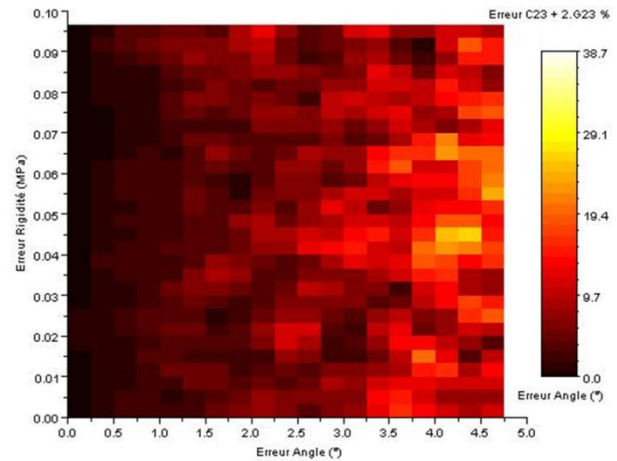


Figure 94 : Sensibilité aux bruits de mesures de la méthode d'inversion associée à la détermination de $(C_{23} + 2.G_{23})$.

La sensibilité au bruit de mesure de l'algorithme d'inversion est étudiée en introduisant un bruit aléatoire dont l'intervalle de confiance à 95% est fixé. Ce bruit est ajouté aux valeurs d'angles et aux valeurs de C_{22}^* . L'application numérique est réalisée pour une valeur maximale du bruit angulaire de $\pm 5^\circ$ et pour une valeur maximale du bruit de mesure de C_{22}^* de ± 0.1 GPa. Pour chacun des 6 termes de la solution, la valeur absolue de l'erreur par rapport à la valeur exacte (%) est calculée. La Figure 93 et la Figure 94 montrent les 2 termes de la solution les plus sensibles au bruit de mesure (uniquement pour le cas considéré et pour les paramètres utilisés). L'effet de l'erreur angulaire est plus important que l'erreur sur la valeur de C_{22}^* . Pour des erreurs angulaires inférieures à 2° , les incertitudes associées aux C_{ij} $\{i : 1, 2, 3\}$ sont inférieures à 5% et les incertitudes associées aux $(C_{ij} + 2 G_{ij})$ $\{i, j : 1, 2, 3\}$ sont inférieures à 10%.

La modélisation théorique du problème direct (résultats d'une série d'essais ultrasonores en transmission sur une sphère orientée) a permis de proposer une méthode de détermination des axes d'orthotropie du matériau. La solution proposée du problème inverse (détermination des constantes de rigidité du matériau) n'a pas permis de déterminer les 9 inconnues du problème mais 6 d'entre elles. La solution apparaît comme étant plus sensible à l'incertitude sur les angles d'orientation des essais sur la sphère qu'à l'incertitude sur la détermination de la rigidité apparente.

3.3. Imagerie bidimensionnelle

3.3.1. Contrôle acoustique

3.3.1.1. Délaminations des assemblages collés

L'imagerie acoustique a d'abord été abordée pour détecter les défauts de collage des longerons de voilure des avions DR400 produits par la société APEX Aircraft (étude industrielle en 2002, point 8 de la Figure 67). Cette étude de faisabilité constitue la deuxième étape de l'ensemble de la démarche "Recherche et Développement" d'une méthode de contrôle non destructif adaptée à la détection des défauts de collage des longerons de voilure DR400.

Les éprouvettes sont constituées d'un tasseau de Pin d'Oregon ayant pour dimensions 30x30x265 mm³ sur lequel est collé une plaque de contreplaqué Bouleau de dimensions 3,2x60x265 mm³. Ces éprouvettes sont au nombre de 16, réparties en 4 lots de 4 unités. Chaque lot correspond à un type particulier de défaut simulé qui se traduit par une répartition de collage différente (Figure 95), la surface de collage restant constante. Les surfaces délaminées sont frottées avec un pain de paraffine pour éviter le collage.

Le dispositif expérimental est montré à la Figure 96. Le dispositif est composé d'une part d'éléments (générateur de signaux et excitateur mécanique) permettant d'exciter la structure testée et d'autre part d'éléments (microphone, capteur de force, amplificateur – conditionneur, carte d'acquisition et ordinateur) permettant d'enregistrer et d'analyser les vibrations émises par la structure.

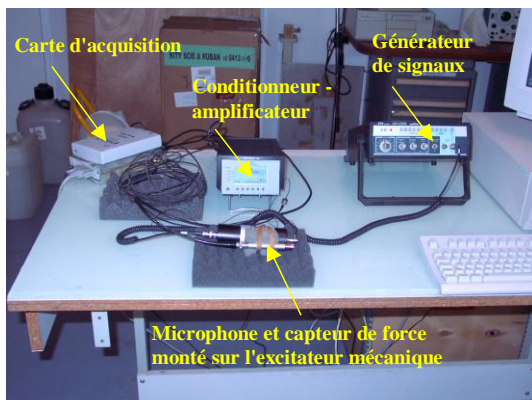


Figure 96 : Dispositif expérimental de laboratoire.

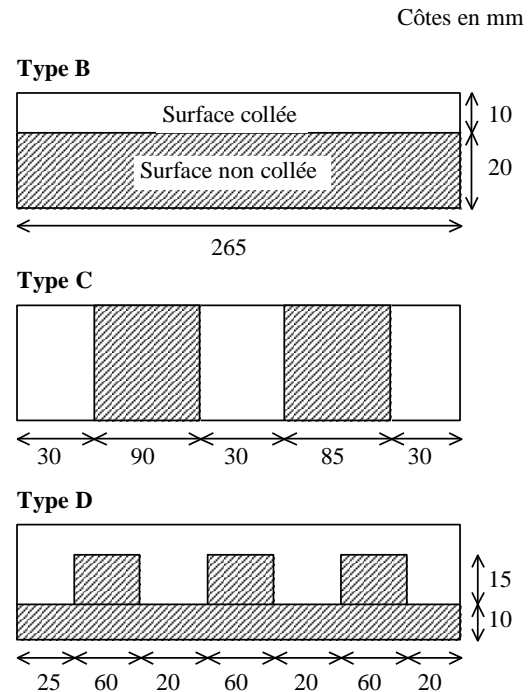


Figure 95 : Répartition des surfaces collées par type de défaut (A ne comporte pas de défaut).



La structure est testée en sollicitation forcée à fréquences balayées. Le sinus balayé est produit par le générateur de signaux, cette information électrique est ensuite convertie en vibrations mécaniques par l'intermédiaire de l'excitateur qui est lié par simple contact à la structure testée. Sous l'action de l'excitateur la structure vibre et les vibrations rayonnées sont enregistrées par le microphone, tandis que les vibrations de couplage excitateur – structure sont enregistrées par le capteur de force.

L'opérateur utilise un gabarit sur la partie haute ou basse du placage, avec pour référence le bord supérieur ou inférieur, pour marquer les points où les mesures sont effectuées. Une mesure est ensuite effectuée en chaque point marqué ; l'opérateur pose l'embout de l'excitateur sur le placage en un point de test et recherche la fréquence de résonance du système structure – excitateur (système couplé) puis enregistre la fréquence trouvée.

La Figure 97 montre le glissement de la fréquence de résonance mécanique lorsque le point d'excitation passe de la zone collée à la zone non collée. Ce glissement entre zone se fait de manière continue ce qui autorise l'emploi de techniques mathématiques de reconstruction d'information par interpolation de type spline. Cette technique pourra être employée en post – traitement sur des essais de relevé cartographique.

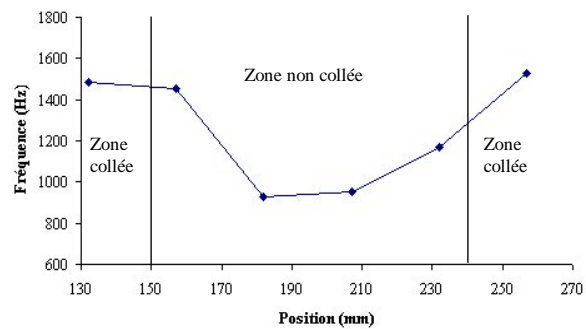


Figure 97 : Exemple d'évolution des fréquences de résonance du contact mécanique en fonction de la position en longueur du point d'excitation.

La fréquence de résonance moyenne sur zone collée (1455 Hz) est supérieure à la fréquence de résonance moyenne sur zone non collée (1256 Hz). Cette inégalité est toujours vérifiée, et conduit à une différence moyenne entre zone collée et non collée d'environ 200 Hz. L'influence de la surépaisseur due à la présence du joint de paraffine entre éprouvettes préparées et non préparées en laboratoire sur la fréquence de résonance moyenne sur zone non collée se traduit par une différence de 90 Hz environ. Cette influence ne masque pas la différence existante entre résonance mécanique sur zone collée et non collée.

Les données expérimentales présentées comme exemple à la Figure 97 permettent d'élaborer une cartographie des zones testées pour y déceler la présence de délamination. La technique de reconstruction d'information par interpolation de type spline a été utilisée pour construire les figures suivantes. Ces quatre figures sont des exemples de cartographies réalisées pour les différents types de délamination envisagés.

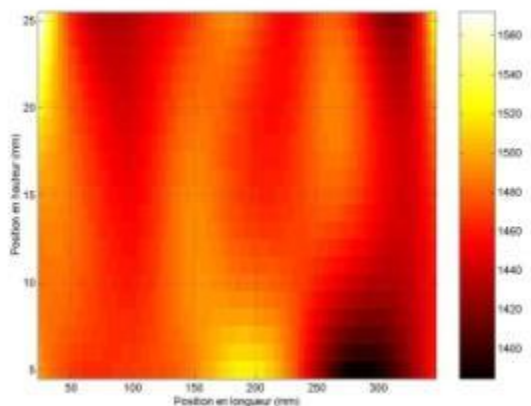


Figure 98 : Cartographie en fréquences de résonance d'une éprouvette de type A.

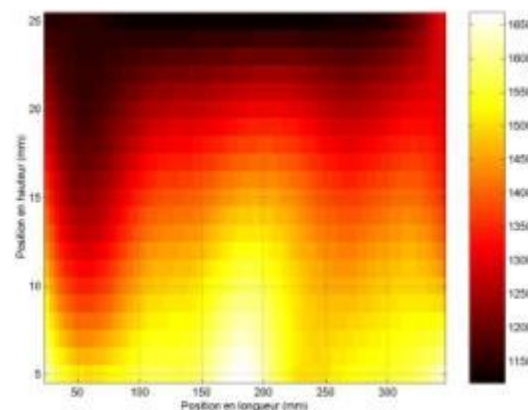


Figure 99 : Cartographie en fréquences de résonance d'une éprouvette de type B.

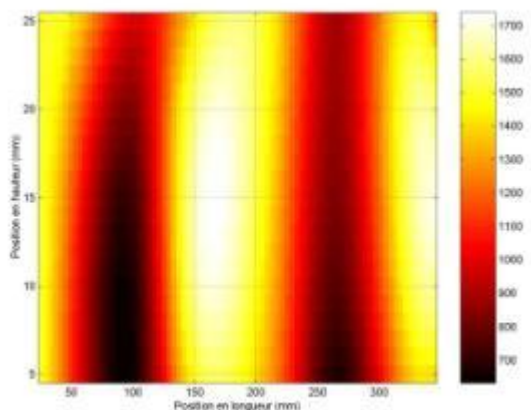


Figure 100 : Cartographie en fréquences de résonance d'une éprouvette de type C.

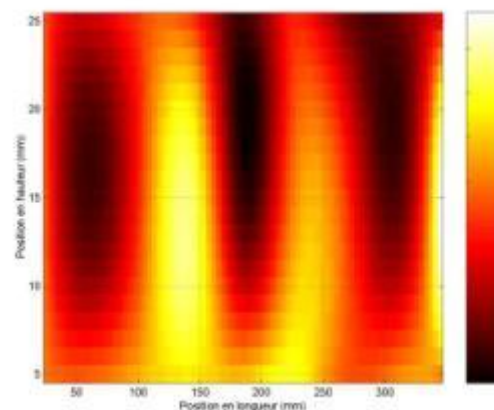


Figure 101 : Cartographie en fréquences de résonance d'une éprouvette de type D.

La Figure 98 concerne une éprouvette de référence (absence de délamination). Les valeurs numériques des fréquences de résonance sont repérées par une échelle de couleur. La plage de fréquence couverte pour cette éprouvette va de 1400 Hz à 1560 Hz environ, la répartition est quasi uniforme sans tendance marquée.

La Figure 99 montre une éprouvette de type B avec une délamination s'étirant dans le sens de la longueur. La limite entre surface collée et non collée a été fixée lors de la fabrication de l'éprouvette à 10 mm du bord. Sur la figure, la plage de fréquence va de 1150 Hz à 1650 Hz environ, la répartition n'est pas uniforme. La zone allant de 5 mm à 15 mm en ordonnées (de 1400 Hz à 1650 Hz) situe la surface où le collage est présent. La zone rouge à 1400 Hz situe la zone de transition entre parties collées et délaminées. Au-delà de 20 mm, la zone entre 1150 Hz et 1250 Hz est nettement une zone de délamination.

Sur la Figure 100 (éprouvette de type C avec une délamination alternée), la plage de fréquence va de 700 Hz à 1700 Hz environ, la répartition n'est pas uniforme, l'alternance entre zone collée et délaminée

est nettement visible. Les zones allant de 50 mm à 140 mm, de 230 mm à 300 mm en abscisses (de 700 Hz à 1200 Hz) situe la surface où le collage est absent.

Sur la Figure 101 (éprouvette de type D avec une délamination crantée), la plage de fréquence va de 1300 Hz à 1650 Hz environ, la répartition n'est pas uniforme. L'alternance entre zone collée et délaminée est nettement visible, la présence de "crans" est marquée par une zone collée allant de 5 mm à 10 mm en ordonnées (de 1450 Hz à 1600 Hz) dans la longueur de l'éprouvette. Les zones allant de 10 mm à 100 mm, de 150 mm à 210 mm, et de 260 mm à 320 mm en abscisses (de 1300 Hz à 1400 Hz) situent la surface où le collage est absent.

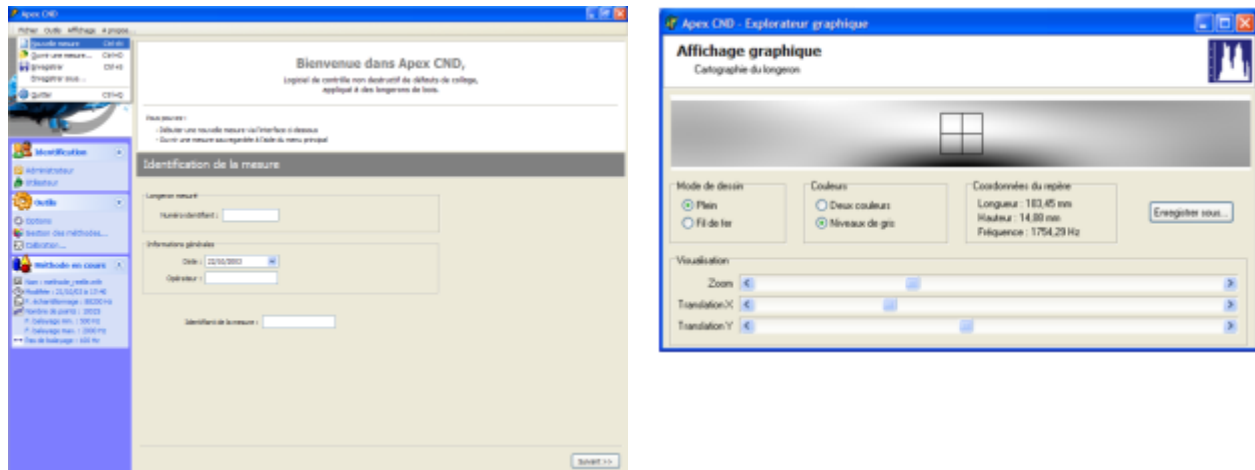


Figure 102 : Captures d'écran de l'interface du dispositif de contrôle réalisé pour la société Apex Aircraft.

Faisant suite à l'étude de faisabilité, un dispositif de contrôle a été réalisé (logiciel APEX CND, 2003). La Figure 102 montre l'interface de l'application avec un exemple de cartographie (image de droite).

3.3.1.2. Délaminations d'un composite de renforcement d'étanchéité

Une deuxième application de détection des délaminations par méthode acoustique a été réalisée à partir de 2003 pour la société IPRS (point 9 de la Figure 67, le développement s'est terminé en 2006). Quatre panneaux en béton revêtus du composite époxy constituent les échantillons de l'étude. Ces échantillons comportent des délaminations de nature et de taille différentes. Les panneaux ont pour dimensions de surface 60 x 100 cm².

Les essais vibratoires sont réalisés sur chaque échantillon en utilisant deux techniques d'excitation – mesure : (1) marteau – microphone et (2) contact frottant – microphone. La première technique est utilisée en mesure point par point. La deuxième technique est utilisée par balayage linéaire sur chaque panneau. Lors d'un essai par impact (Figure 103), un choc est donné au marteau instrumenté en un point précis de mesure. L'évolution de la force en fonction du temps est alors enregistrée au moyen d'un capteur situé sur la tête du marteau. Le signal sonore rayonné par l'échantillon est également capté par un microphone. Un essai par contact frottant (Figure 104) est réalisé au moyen d'une brosse dont la longueur des poils métalliques a préalablement été ajustée. La brosse est mise en contact avec la surface

inspectée en essayant de maintenir une pression et une vitesse d'avance aussi constante que possible afin d'effectuer un balayage rectiligne en allant du haut vers le bas de l'échantillon. Le signal sonore rayonné est capté par un microphone.



Figure 103 : Détail d'un essai par impact.



Figure 104 : Détail d'un essai par contact frottant.

Sollicitation par impact

Afin d'étudier l'effet opérateur sur le signal force de contact en fonction du temps enregistré par le marteau, différents types de choc caractérisés par une force maximale croissante ont été réalisés sur une zone de délamination franche du premier panneau. La Figure 105 montre une superposition des différentes courbes obtenues. Quelle que soit l'intensité du choc, la présence d'un double impact est toujours visible. Cependant la différence des temps caractéristiques des gaussiennes identifiées varie en fonction du type de choc.

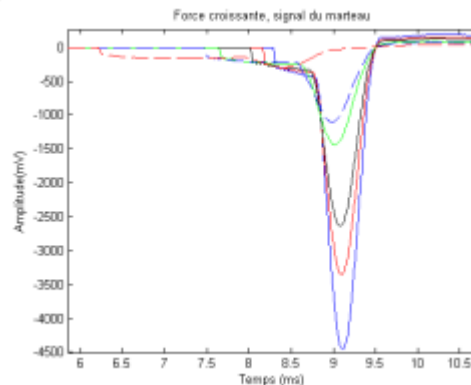


Figure 105 : Evolutions de la force de contact en fonction du temps pour différents types de choc au marteau.

La différence est plus importante pour une faible intensité que pour une forte intensité. Ce phénomène s'explique par la vitesse du marteau au moment du choc : plus la vitesse sera grande est plus la différence des temps caractéristiques entre les 2 impacts sera faible. Cette dernière remarque a une conséquence importante sur la pertinence du paramètre de différence des temps caractéristiques comme indicateur de la présence d'une délamination. Ce paramètre est un indicateur si l'intensité du choc est modérée avec une force de contact maximale dont l'amplitude en valeur absolue est comprise entre 500 mV et 1000 mV. Pour des valeurs inférieures à 500 mV, le choc est si faible que le deuxième choc contre le support en béton ne se produit pas. La gamme [500 ; 1000] mV correspond dans la pratique au choc « moyen » donné par un opérateur.

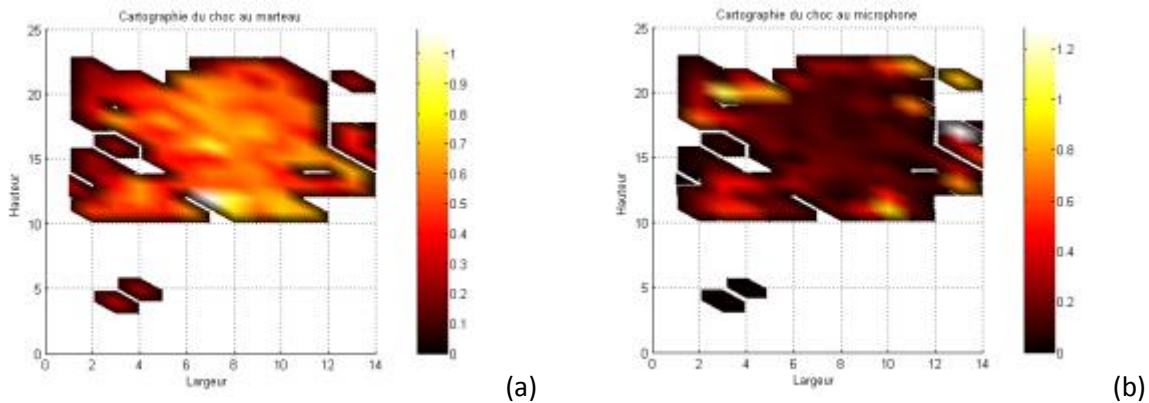


Figure 106 : Cartographies obtenues à partir des signaux captés au marteau (a) et microphone (b).

Les mesures vibratoires en point par point réalisées au marteau et au microphone ont permis d'établir des cartographies des zones inspectées (Figure 106). Ces cartographies sont réalisées à partir de l'amplitude du paramètre indicateur de délamination retenu pour le marteau (différence des temps caractéristiques des gaussiennes identifiées) et pour le microphone (ratio des surfaces de la courbe d'analyse en fréquence). Lorsque la valeur du paramètre indicateur est forte (couleur claire sur les figures), une délamination est présente. Sur la figure, la présence de délaminations est nettement visible dans la partie supérieure du panneau. Il est important de remarquer que le paramètre indicateur est maximal au centre d'une délamination pour le marteau, alors qu'il est maximal sur les bords de la délamination pour le microphone.

Sollicitation par contact frottant

La réponse vibratoire d'une structure lamifiée à une excitation mécanique est liée à ses caractéristiques matérielles et géométriques. Toute modification de ces grandeurs par la présence d'hétérogénéités, en particulier des délaminations, se répercute dans la représentation en fréquence de la réponse vibratoire. Dans le cas d'une structure lamifiée comportant des délaminations, chaque décollement de la couche de surface est assimilable à une plaque mince (ou peau de tambour) dont les bords sont encastres. Chacune de ces plaques minces possède des modes propres de vibration (pics en fréquence) différents de la structure globale dont elle fait partie.

La gamme de fréquence couverte par la sollicitation mécanique du contact frottant doit correspondre aux premiers modes de vibration des plaques minces (décollement de la couche de surface) recherchées. C'est pourquoi la détection des défauts de délamination est d'autant plus aisée que l'excitateur est adapté au type de défaut recherché (dans le cas présent la longueur et la nature des poils de brosse doit être adaptée).

La détection des délaminations par la technique du contact frottant repose sur l'analyse du signal en temps réel lorsque la brosse se déplace sur la surface contrôlée. Cette analyse est constituée par l'identification de la caractéristique en fréquence ou signature acoustique d'un certain type de délamination recherchée. L'exploitation des signaux vibratoires doit alors permettre une analyse

simultanée en temps et en fréquence par opposition à l'analyse de Fourier qui décompose un signal en une superposition infinie d'ondes éternelles parfaitement délocalisées dans le temps. L'analyse de Fourier *globale*, qui perd toute notion de chronologie, est remplacée par une succession d'analyses *locales* relatives à une fenêtre d'observation glissante dans le temps. La transformée de Fourier à fenêtre glissante n'est qu'une des solutions apportées au problème de la recherche d'une description temps-fréquence des signaux ; elle est choisie dans le cadre de cette étude en raison de sa facilité et du caractère intuitif de sa mise en œuvre (c'est la plus ancienne méthode connue, elle date de 1890, essor des méthodes temps fréquences à partir des années 1940).

La Figure 107 montre un exemple de signal vibratoire obtenu par balayage unidirectionnel d'une brosse sur un panneau. Sur cette figure, les zones non délaminées sont caractérisées sur le spectrogramme par la présence de basses fréquences dans une gamme allant de 10 Hz à environ 1000 Hz (de 0 s à 1 s puis de 6 s à un peu plus de 8 s). Les zones délaminées sont identifiables par la présence de hautes fréquences très supérieures à 1000 Hz (de 1 s à 6 s). En analysant la description temps-fréquence du signal obtenu, la vitesse de défilement de la brosse par rapport à la structure étant connue, la détection de la présence d'une délamination et son positionnement sont alors possibles.

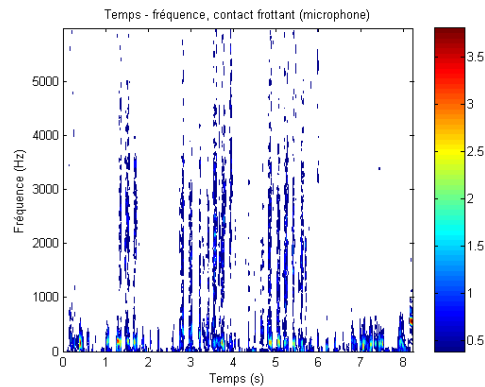


Figure 107 : Représentation temps-fréquence du signal vibratoire obtenu sur un panneau (spectrogramme).



Tête de sondage dans sa mallette. ↑

Acquisition des données et cartographie
des délaminations. →

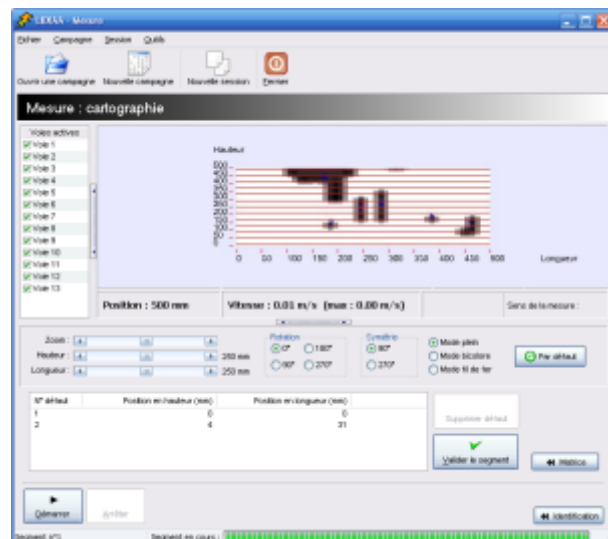


Figure 108 : Dispositif de contrôle LIDIAA.

C'est cette dernière technique qui a été retenue pour développer le dispositif de contrôle LIDIAA en 2006 (Figure 108). Ces machines sont toujours utilisées actuellement.

3.3.2. Tomographie acoustique

Mes premiers travaux de tomographie ont été faits dans le domaine acoustique avec Adil Dikrallah (thèse soutenue en 2007). L'objectif de la thèse d'Adil était la détection des dégradations biologiques dans les cèdres du Maroc. Les dégradations biologiques sont causées par la maladie du « Mjej » (pourriture blanche du *Phellinus chrysoloma* qui infecte le duramen et se développe à la faveur des blessures de l'arbre, généralement en hauteur vers 5 m) et dans une moindre mesure par la maladie du « Saboun » (pourriture cubique du *Fomitopsis pinicola* et du *Lariciformis officinalis* qui s'attaque plutôt aux arbres déjà affaiblis par l'âge, généralement à la base du tronc du centre vers l'extérieur et vers le haut) (M'hirit, 2006 ; Dikrallah, 2007). Les résultats ont été publiés en 2010 dans le journal "Comptes Rendus de Mécanique". Les essais réalisés au Cirad sont détaillés dans ce chapitre.

Le dispositif expérimental est présenté à la Figure 110. Il est composé d'un accéléromètre (A), d'un marteau instrumenté (B), d'un logiciel d'acquisition (C), d'un convertisseur analogique-numérique (D) et d'un conditionneur (E) assurant également l'amplification et le filtrage.

Dans un premier temps, il s'agissait d'étudier l'effet de l'anisotropie transverse sur les rayons de propagation. Les sondes sont plantées de façon à ce que les vitesses de propagation soient mesurées suivant des droites formant une géométrie parallèle couvrant la section transverse de la rondelle (Figure 111). Après la réalisation de ces mesures, la rondelle est découpée sous forme de barreaux (section de $3 \times 3 \text{ cm}^2$) de façon à ce que l'axe des sondes coïncide avec l'axe du barreau. Sur chaque barreau on détermine ensuite la vitesse de propagation de la même manière que pour la rondelle entière.



Figure 110 : Dispositif expérimental pour les essais de tomographie.

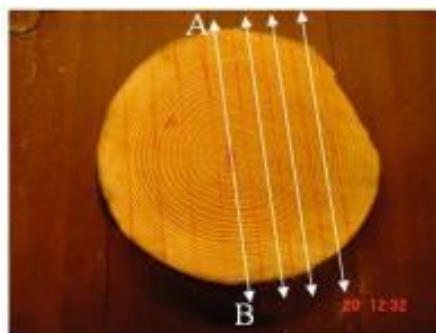


Figure 111 : Rondelle servant à l'étude de l'effet de l'anisotropie sur les rayons de propagation.

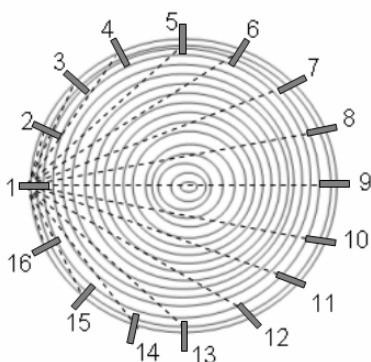


Figure 109 : Schéma d'un essai de tomographie en géométrie éventail.

Dans un deuxième temps, des essais de tomographie acoustique sont réalisés (Figure 109). Un essai vibratoire avec marteau force et accéléromètre est effectué sur chacune des 16 sondes disposées en géométrie de type éventail. L'accéléromètre est fixé magnétiquement sur des vis préalablement plantées dans la rondelle testée. Le point d'impact est une sonde émettrice (1), les quinze autres sondes sont réceptrices {2,...,16}. La procédure est ensuite répétée avec un point émetteur (2), jusqu'à atteindre le point émetteur (16). L'ensemble des mesures est réalisé manuellement par un opérateur en une heure et demie.

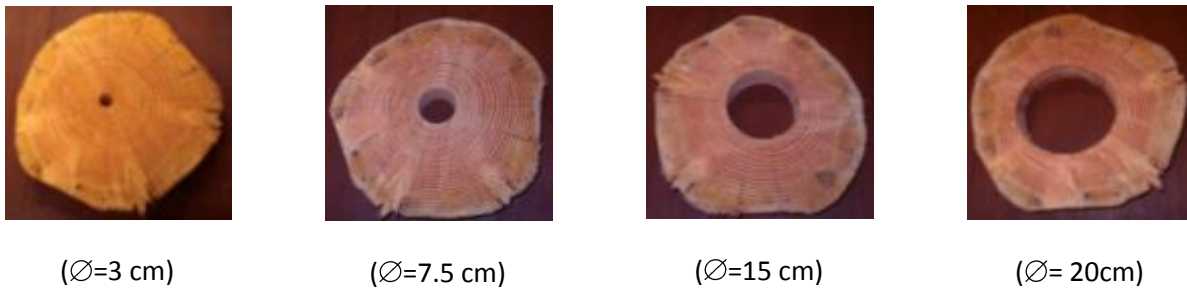


Figure 112 : Rondelle pour essais de tomographie après perçages successifs.

Une rondelle contenant des défauts artificiels (Figure 112) et deux rondelles contenant des défauts naturels sont testées. Les défauts artificiels sont des trous circulaires percés au centre par prélèvement successif. Les défauts ont pour diamètre 3 cm, 7.5 cm, 15 cm et 20 cm (le diamètre moyen est de 48 cm). Pour chaque taille de défaut, la rondelle est testée dans les mêmes conditions d'encastrement suivant les mêmes points sondés.

L'algorithme utilisé pour calculer les images en tomographie est basé sur la rétroprojection filtrée à partir des mesures des lenteurs de propagation (filtre de Shepp-Logan). Les rayons de propagations sont alors supposés rectilignes (hypothèse d'un matériau isotrope transverse).

L'effet de l'anisotropie a d'abord été étudié par simulation numérique. Deux modèles de propagation ont été utilisés. Le premier modèle suppose des rayons de propagation rectilignes. Le résultat est montré à la Figure 113-a. Sur cette figure, les courbes en pointillés ne sont pas des fronts d'onde (chaque rayon droit étant indépendant les uns des autres). Tout se passe comme si plusieurs barreaux avaient été découpés puis testés (la découpe des barreaux se ferait alors selon une géométrie éventail pour cette figure). Le deuxième modèle (Figure 113-b) est basé sur l'approche proposée par Vinje (1993) pour un matériau anisotrope. A chaque itération (pas de temps), la position du front d'onde est calculée en plusieurs positions angulaires puis entièrement déterminée par interpolation. L'itération suivante utilise le front d'onde calculé précédemment pour déterminer le rayon de propagation puis la position du nouveau front d'onde en plusieurs positions angulaires. La Figure 113-b est tracée dans le cas où le module d'élasticité radial est égal à 2 fois le module tangentiel et égal à 10 fois le module de cisaillement transverse ($E_T/E_R = 0.5$ et $G_{RT}/E_R = 0.1$, les coefficients de Poisson sont négligés).

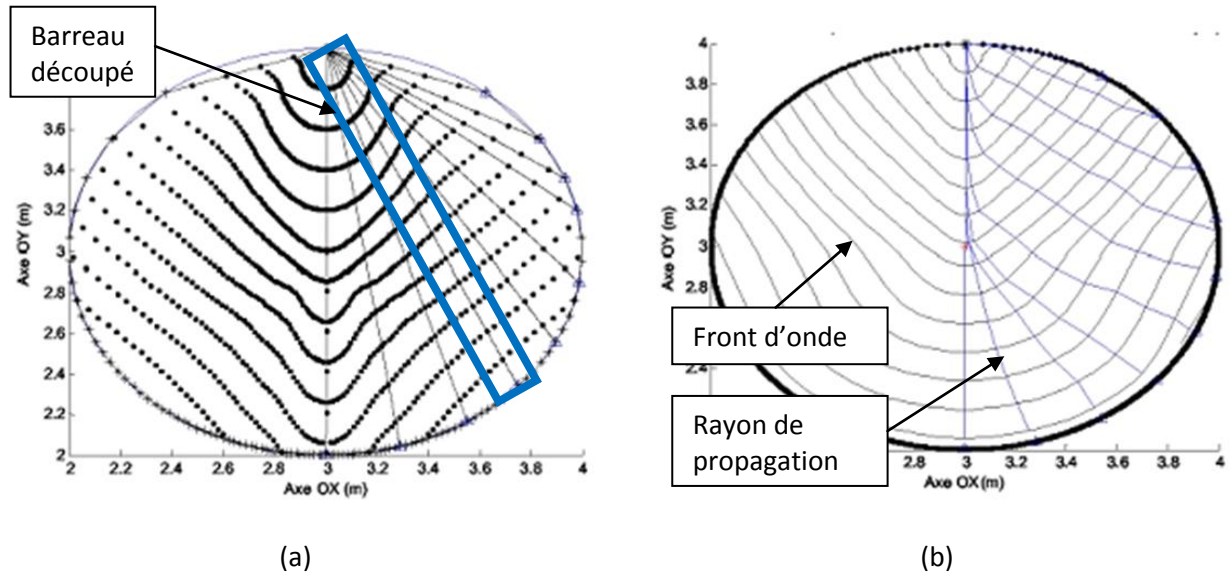


Figure 113 : Simulation numérique de la propagation en supposant des rayons rectilignes (a) ou des rayons courbes (b).

Les résultats obtenus par simulation montrent que l'anisotropie transverse a pour effet de déformer le front d'onde au cours de la propagation. Les rayons ne sont pas droits mais courbés vers le centre pour s'orienter dans la direction radiale (direction où la vitesse de propagation est la plus élevée). Des résultats similaires à la Figure 113-b ont été publiés par Maurer en 2005.

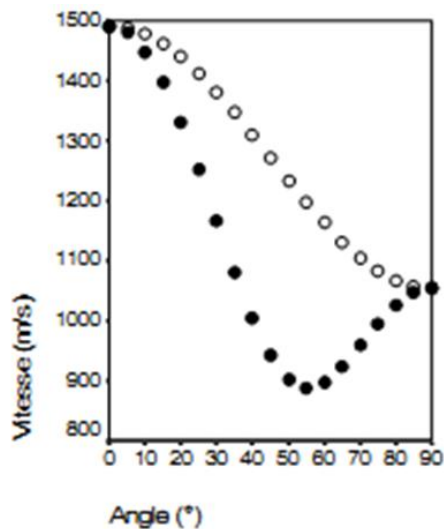


Figure 114 : Evolution théorique de la vitesse de propagation en fonction de l'angle d'orientation. • rayons rectilignes, o rayons courbes.

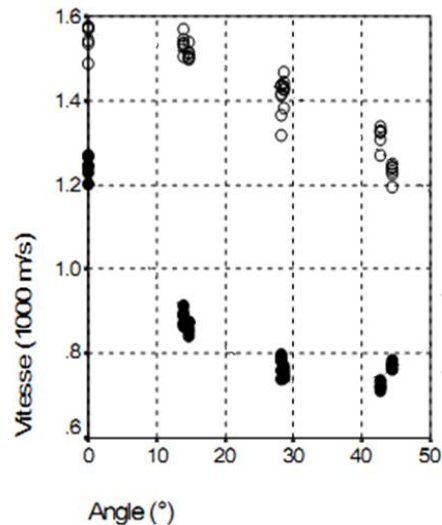


Figure 115 : Vitesse de propagation mesurée expérimentalement en fonction de la position angulaire. • après découpe en barreau (rayons rectilignes), o avant découpe (rayons courbes).

La simulation numérique a permis de comparer les vitesses de propagation obtenues par les deux modèles. Chaque point de comparaison est repéré en fonction de l'angle d'orientation entre la direction radiale et la direction d'émission - réception. La Figure 114 présente la variation de la vitesse de

propagation pour les ratios $E_T/E_R = 0.5$ et $G_{RT}/E_R = 0.1$. La différence observée est maximale pour un angle d'environ 55° . Pour un angle de 0° (direction radiale) et 90° (direction tangentielle), il n'y a pas de différence entre les deux modèles. Le résultat des essais expérimentaux avant et après découpe de la rondelle est présenté à la Figure 115. Cette figure montre des évolutions similaires à celles de la Figure 114. Les observations obtenues par simulation numérique sont vérifiées par l'expérience. La différence entre les deux figures pour un angle de 0° s'explique par les hypothèses de la simulation numérique : coefficients de Poisson négligés et vitesse de propagation déterminée à partir de la théorie unidimensionnelle.

L'hypothèse de rayon de propagation rectiligne dans la section transverse du bois n'est donc pas vérifiée. La conséquence de l'hypothèse de rayons droits (hypothèse de Radon) est l'obtention d'une image d'autant plus floue (délocalisation spatiale) que l'anisotropie sera importante. Pour le bois de Cèdre, Adil a déterminé les valeurs moyennes de module d'élasticité à partir de 10 éprouvettes dans chaque direction matérielle (dimensions de $2 \times 2 \times 3 \text{ cm}^3$, essai statique en compression). Les valeurs moyennes calculées sont : $E_R = 1010 \text{ MPa}$ (écart type 110 MPa), $E_T = 860 \text{ MPa}$ (écart type 100 MPa). Le ratio d'anisotropie transverse correspondant est de 0.9.

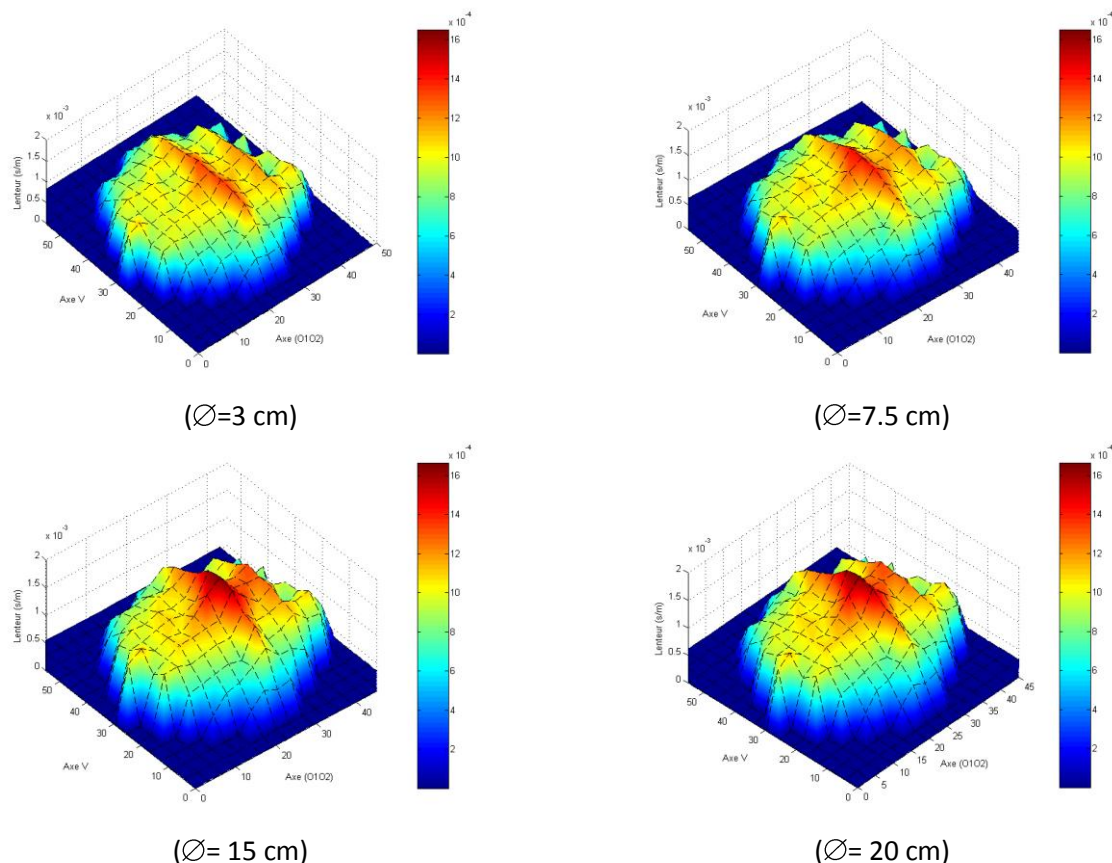


Figure 116 : Reconstitutions tomographiques de la rondelle après perçages successifs.

Les images tomographiques associées à la rondelle comportant des défauts artificiels sont présentées à la Figure 116. Toutes les images reconstituées possèdent une zone de lenteurs très élevées au centre qui devient de plus en plus visible au fur et à mesure que le diamètre du défaut augmente. La présence de

singularités naturelles en particulier les nœuds de faible section sont difficilement détectables. Ceci est dû à la résolution spatiale et à la méthodologie tomographique employée.

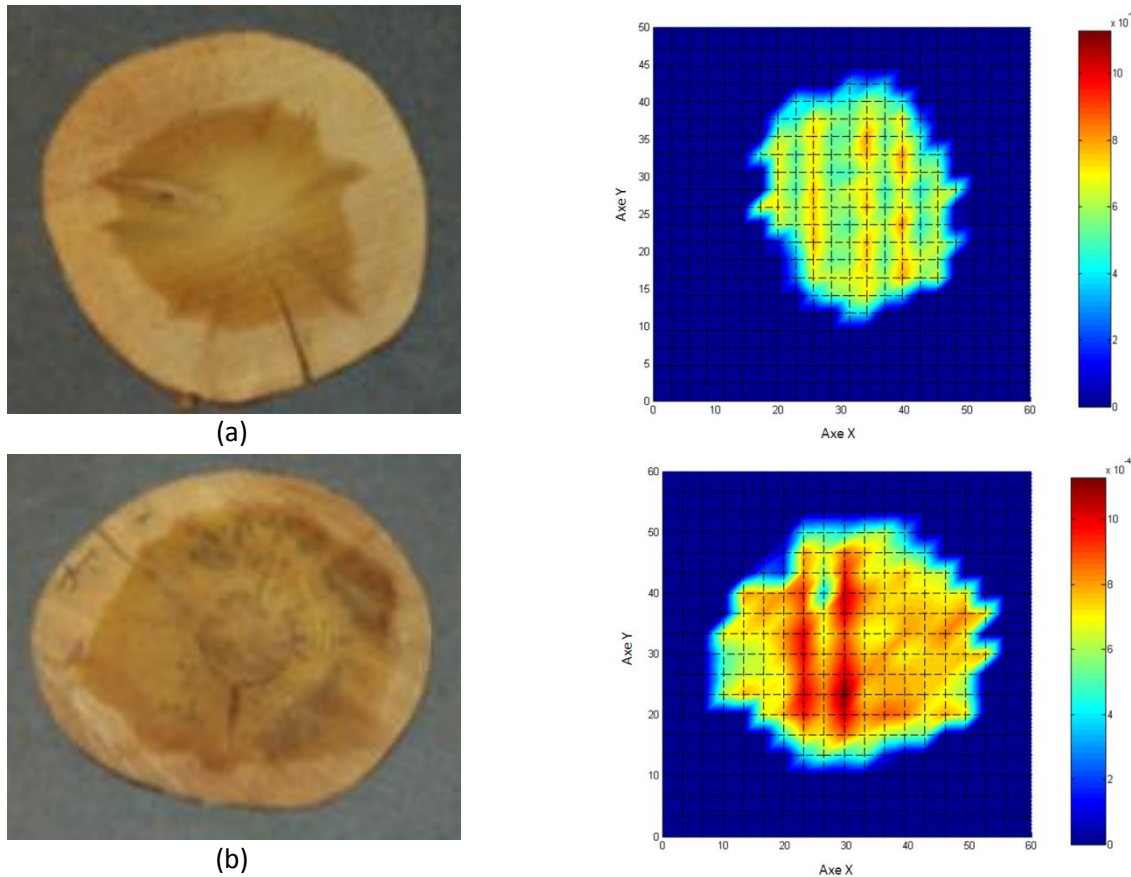


Figure 117 : Reconstructions tomographiques des rondelles contenant des défauts naturels.

La Figure 117 montre les cartographies des lenteurs comparées avec l'état réel de la section cartographiée. Sur la projection bidimensionnelle, les zones altérées se caractérisent par un fort contraste en rouge sur les figures. La fissure radiale de la photographie Figure 117-a est due au phénomène de séchage et est apparue après les mesures de tomographie. Comme pour les essais antérieurs, la présence des nœuds n'est pas détectable.

L'étude des mesures de tomographie a mis en évidence le problème de distorsion due à l'anisotropie transverse du matériau associé à une délocalisation spatiale due au faible nombre des sondes et à l'imperfection du code de reconstruction (un artefact de calcul provoque un étirement des zones de fort contraste dans le sens OY). A ces imprécisions s'ajoute celle de la détermination physique de la lenteur due à une incertitude forte dans la zone périphérique et à la fréquence principale des signaux reçus (très basse fréquence donc une forte délocalisation temporelle). Cependant l'effet d'un trou de petit diamètre (3 cm pour un diamètre moyen de 48 cm) a pu être observé sur une image calculée. La détection de petites hétérogénéités est possible (de dimension bien inférieure à la longueur d'onde), mais la qualité de la reconstruction est fortement dépendante des conditions expérimentales et des algorithmes utilisés.

3.3.3. Tomographie ultrasonore

Suite aux travaux d'Adil Dikrallah dans le domaine acoustique, l'utilisation d'une émission ultrasonore contrôlée associée à un système automatique permettant un sondage plus précis nous a semblé indispensable. Ceci afin d'augmenter la résolution spatiale de la reconstruction.

3.3.3.1. Imagerie non paramétrique en réflexion

Dans une première étape, l'imagerie tomographique ultrasonore en réflexion a été employée pour évaluer l'intégrité de bois à l'état vert. Ces travaux ont été publiés dans le journal "Annals of Forest Science" en 2008. La tomographie en réflexion permet d'obtenir des images qualitatives de réflectivité à partir de mesures rétro – diffusées analogues à l'échographie en médecine. Un aspect intéressant de la tomographie en réflexion par comparaison avec la tomographie en transmission est qu'il n'est pas nécessaire de sonder l'objet avec des émetteurs et des récepteurs. L'émission et la réception des signaux sont réalisées par le même transducteur. Le sondage ne nécessite alors qu'une seule rotation du transducteur autour de l'objet.

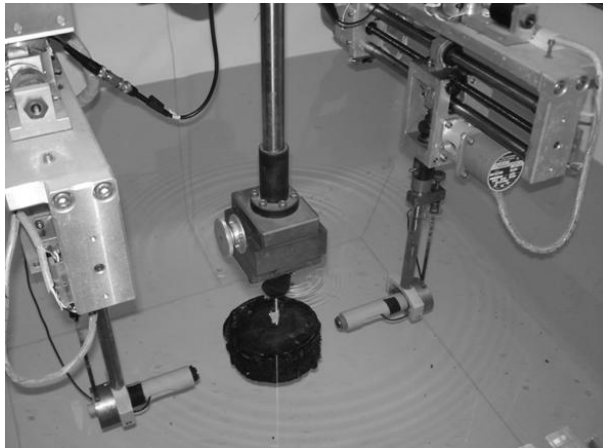


Figure 118 : Dispositif d'imagerie ultrasonore utilisé. Un seul transducteur est actif dans le cas de l'imagerie en réflexion.

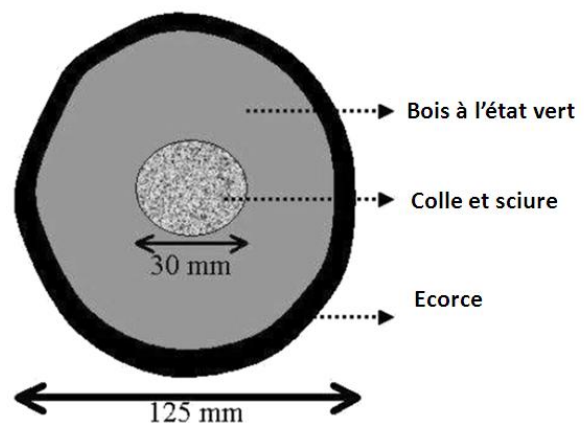


Figure 119 : Schéma de la rondelle d'écépica testée comportant un défaut artificiel au centre.

Le dispositif expérimental était composé d'un seul émetteur – récepteur en rotation pour enregistrer les projections (Figure 118). La fréquence du transducteur était de 500 kHz. Le pas angulaire utilisé (5°) a permis d'obtenir 72 projections (une projection est le signal réfléchi échantillonné sur 4096 points à 20 MHz). Cette technique d'imagerie a été validée en effectuant une simulation numérique et a été appliquée sur une rondelle d'écépica de faible diamètre à l'état vert. L'échantillon d'écépica comportait un défaut artificiel fait de colle et de sciure en son centre (Figure 119).

L'algorithme de reconstruction utilise une approximation linéaire du problème direct (l'approximation de Born) et suppose que la section transversale du bois est isotrope. Il est important de souligner que cette technique ne permet pas une cartographie *quantitative* d'une propriété mais permet uniquement une

cartographie *qualitative* des interfaces entre milieux possédant des contrastes d'impédance acoustique suffisamment élevés.

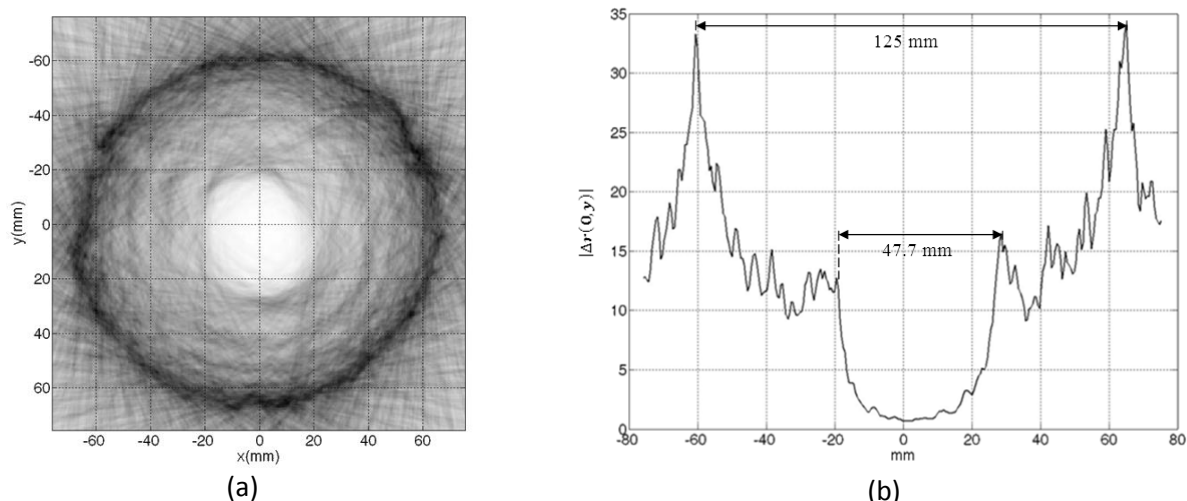


Figure 120 : Reconstruction tomographique obtenue en réflexion (a), coupe de l'image en son milieu (b).

L'image obtenue (Figure 120-a) était géométriquement juste en se référant aux inclusions internes (écorce et défaut ; l'objet étant environné d'eau). L'image a principalement montré la position de l'écorce marquée par un très fort contraste. La proportion d'énergie transmise a cependant été suffisante pour reconstruire l'inclusion artificielle à l'intérieur de l'échantillon. Il était impossible de mesurer son diamètre très précisément avec une résolution proche de la longueur d'onde (3 mm). La mesure du diamètre d'inclusion a été réalisée par un opérateur sur 36 coupes de l'image (un exemple est donné à la Figure 120-b). Le diamètre moyen était de 48.1 mm (valeur minimale : 39.1 mm, valeur maximale : 57.8 mm et écart-type : 4.0 mm) au lieu de 30 mm (valeur vraie). La différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie permet d'estimer la résolution spatiale obtenue d'environ 20 mm, ce qui était très proche du rayon de zone de Fresnel théorique de 18 mm (résolution latérale).

Dans une deuxième étape, nous avons souhaité développer un prototype automatique d'imagerie ultrasonore dédié aux arbres sur pieds. Les travaux de recherche sur ce prototype ont été effectués dans le cadre de l'ANR BIOGMID (point 11 de la Figure 67). Les deux chapitres suivants sont une synthèse d'une partie des travaux de ce projet.

3.3.3.2. Imagerie paramétrique et radiographie X

La thèse de Mohammad-Ali Saadatnia s'est déroulée en France et en Iran. Ses recherches ont été valorisées par une publication dans BioResources (2011) et par un article dans un congrès international (Acoustical Imaging, 2011 ; actes publiés chez Springer en 2012). Pendant la période de présence de Mohammad-Ali en France, le tomographe automatique était en cours de construction ; les essais ultrasonores ont donc été réalisés manuellement par 3 opérateurs.

Il s'agissait d'étudier l'effet du bois de réaction sur la propagation des ondes ultrasonores et de comparer les images obtenues par tomographie ultrasonore et par radiographie X. Deux billons de peuplier et d'épicéa sont testés en raison de la présence de différents types de bois de réaction (bois de tension pour le bois de peuplier et de compression pour l'épicéa). Les arbres ont été choisis parce qu'ils ont présenté une croissance asymétrique visible. Les billons ont une longueur de 1 m et un diamètre moyen de 30 cm pour l'épicéa et de 33 cm pour le peuplier. Chaque billon est coupé en 2 disques au niveau de la partie centrale de (A) 15 cm et (B) de 10 cm d'épaisseur. Les disques (A) sont écorcés. Ces disques sont ensuite recouverts d'un film plastique et conservés à 4°C afin de limiter le processus de séchage naturel.

Les disques (B) sont découpés pour préparer de petits échantillons. Comme illustré à la Figure 121, un canevas est conçu pour l'échantillonnage. Trois cercles sont tracés à une distance de la moelle de 4 cm (pas angulaire de 45°), de 8 cm et 12 cm (pas angulaire de 22.5°). Puis les petits échantillons sont prélevés au niveau de chaque cercle (20 x 20 x 100 mm³). Environ 40 échantillons ont été prélevés pour chaque disque. Parfois, en raison de la forme asymétrique de disques, il n'était pas possible d'échantillonner toutes les positions du cercle externe (les échantillons sont alors prélevés au plus près de la position du canevas).

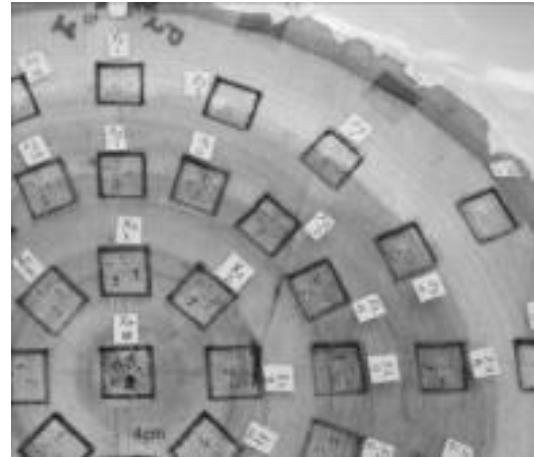


Figure 121 : Canevas pour la découpe des échantillons cubiques sur les disques (B)

Les échantillons des disques (B) sont utilisés pour déterminer la répartition de la teneur en humidité dans la section transversale des billes. La densité a été également mesurée pour les échantillons d'épicéa afin d'identifier les zones de bois de réaction. La présence de bois de réaction a été déterminée par des expériences de microscopie.

Les disques (A) sont utilisés pour les essais de tomographie par ultrasons et pour les radiographies par rayons X. Les essais de radiographie par rayons X ont été réalisés avec une tension de 70 kilo électron volts associée à une intensité de 4 mA. Le temps d'exposition est de 2 secondes par image. La taille des images est de 3200 x 2304 pixels avec une résolution spatiale de 127 µm. L'atténuation des rayons X a été enregistrée avec une résolution de 6 de bits non signé. Dans le cas d'une énergie constante, cette atténuation est fonction de la composition chimique de l'objet (numéro atomique équivalent) et fonction également de sa densité. Pour le bois, l'image radiographique est donc fortement dépendante de la teneur d'humidité et de densité.

Concernant les essais de tomographie, l'émission ultrasonore est un train d'ondes carrées (10 périodes de 480 V). La fréquence d'émission est de 80 kHz (diamètre de la sonde de 3.2 cm). Le signal analogique de sortie a été amplifié de 66 dB. L'acquisition a été réalisée par un convertisseur de résolution 16 bits et une fréquence d'échantillonnage de 500 kHz. La durée d'acquisition est de 2048 µs. Le signal de sortie est préalablement filtré par une ondelette de Morlet à 80 kHz avec une bande passante de 20 kHz (compromis entre l'efficacité du filtrage et la délocalisation temporelle induite). Le signal analytique est

ensuite calculé pour déterminer l'enveloppe temporelle. Le temps de vol (TOF) est défini comme le premier passage de l'enveloppe au-dessus du niveau de bruit.

Les images tomographiques ont été calculées selon la théorie de Radon et en utilisant un algorithme de rétroprojection filtré (filtre de Shepp-Logan) en géométrie de type éventail. Les paramètres intrinsèques sont la lenteur (s/m) et l'atténuation (dB/m à 80 kHz). Le pas angulaire de sondage est 20°, ce qui conduit à 306 acquisitions (équivalent à 18 sondes). Le sondage est réalisé par 3 opérateurs qui ont déplacé manuellement les sondes autour des disques. La limite supérieure théorique du nombre de pixels calculés est de 153 (maillage de 23 x 23 mm²/pixel). La résolution physique est d'environ 17 mm (résolution axiale : longueur d'onde) et de 37 mm (résolution latérale). Cette résolution conduit à un maillage de 25 x 25 mm²/pixel en accord avec la résolution induite par le nombre de points de sondage utilisé.

Paramètres ultrasonores	Bois normal		Bois de réaction		U test p-value
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	
Peuplier	N=19		N=16		
Lenteur (10 ⁻⁶ s/m)	1328	87	1496	100	<0.001
Atténuation (dB)	-17.2	1.1	-18.3	1.4	0.016
Epicéa	N=38		N=10		
Lenteur (10 ⁻⁶ s/m)	1210	212	721	194	<0.001
Atténuation (dB)	-12.1	2.4	-6.8	1.6	<0.001

Tableau 18 : Statistiques descriptives et résultats du test U de Mann-Whitney pour le bois normal et bois de réaction.

Le Tableau 18 présente les statistiques descriptives de la lenteur et de l'atténuation selon le type de bois (normal ou bois de réaction). La comparaison des moyennes est effectuée à l'aide d'un test non paramétrique car l'hypothèse de normalité n'est pas vérifiée et le nombre d'observation est très faible (échantillons des disques B). Le test U de Mann-Whitney a été choisi ; Il teste deux échantillons indépendants. Des différences significatives sont observées pour la lenteur et l'atténuation. Le peuplier et l'épicéa ont des comportements opposés. Pour le peuplier, la lenteur est plus élevée pour le bois de tension que pour le bois normal (différence de 13 %, dans le plan radial-tangentiel). L'atténuation est constante entre bois de tension et bois normal. Pour l'épicéa, la lenteur est plus faible pour le bois de compression que pour le bois normal (différence de 40 %). L'atténuation suit une tendance inverse (écart de 44 %).

Les fibres du bois de tension sont généralement plus longues que celles du bois normal. En général, la paroi des cellules est composée des couches S1 et S2. Une couche gélatineuse (G) est présente au lieu de la couche S3. Cette couche spécifique n'est pas très liée avec la couche interne de la paroi cellulaire. Les micro-fibrilles de cellulose dans la couche G sont orientées presque parallèlement à l'axe longitudinal de la cellule (angle de l'ordre de 5°). La couche G possède un faible niveau de lignification comparé au bois normal. La présence de cette couche, peu liée avec la couche interne et possédant un faible angle des micro-fibrilles, ne contribue pas à renforcer la rigidité dans le plan radial-tangentiel. Cette conclusion est

renforcée par le faible niveau de lignification. En outre, l'augmentation de la densité due à la présence de la couche G n'est pas une caractéristique clef du bois de tension. Ces remarques conduisent à penser que le bois de tension possède une plus faible rigidité dans le plan transversal et donc une plus forte lenteur des ultrasons. Les caractéristiques de la couche G expliquent l'amortissement plus élevé des ondes ultrasonores.

Les trachéides du bois de compression sont généralement plus arrondies en coupe transversale ; elles ont une paroi plus épaisse et des espaces intercellulaires (absent dans le bois normal). Les trachéides sont également plus courtes. La paroi secondaire est différente de celle des trachéides de bois normal. Au lieu des trois couches présentes, il y a deux couches seulement (S1 et S2). Les différences sont plus prononcées dans la couche S2 : l'angle des micro-fibrilles est beaucoup plus élevé que dans le bois normal (45° ou plus). Il y a également une plus grande proportion de lignine présente. L'épaisse paroi de bois de compression induit également une forte densité. L'orientation typique de l'angle des micro-fibrilles est la cause d'une réduction de la rigidité dans le sens longitudinal et une augmentation de la rigidité dans le plan radial-tangentiel. La lignine contribue aussi à renforcer la rigidité dans le plan radial-tangentiel. L'augmentation de la rigidité dans ce plan explique la faible lenteur des ultrasons du bois de compression. Concernant l'atténuation, la forte densité (paroi très épaisse) explique le faible amortissement des ondes ultrasonores.

Pour permettre une correspondance entre image de tomographie ultrasonore et radiographie par rayons X (disques A), chaque image (de tomographie et de radiographie) est ré-échantillonnée en 484 points (Figure 122). Le pas d'échantillonnage ainsi que le rayon était de 7.5 mm et le secteur angulaire variait de 5.5° à 120°. Pour chaque point d'échantillonnage, la valeur moyenne de l'image a été calculée dans une zone de diamètre égal à 20 mm.

La tomographie de lenteur et la radiographie du peuplier sont montrées dans la Figure 123. La radiographie révèle une zone de couleur claire, près de la périphérie. Cette zone plus claire s'explique par la faible teneur en humidité près du bord.

Suite au prétraitement décrit précédemment, les comparaisons entre tomographie de lenteur, tomographie d'atténuation et radiographie sont présentées à la Figure 124. Une relation linéaire significative est trouvée pour la lenteur ($R^2 = 0.51$, $N = 484$) et pour l'atténuation ($R^2 = 0.51$, $N = 484$). Les modèles linéaires s'écrivent : $\text{Lenteur} \cdot 10^6 = 17 \cdot X + 590$ (erreur standard de $127 \cdot 10^{-6}$ s/m) et $\text{Atténuation} = 0.2 \cdot X - 9$ (erreur standard 1.3 dB).

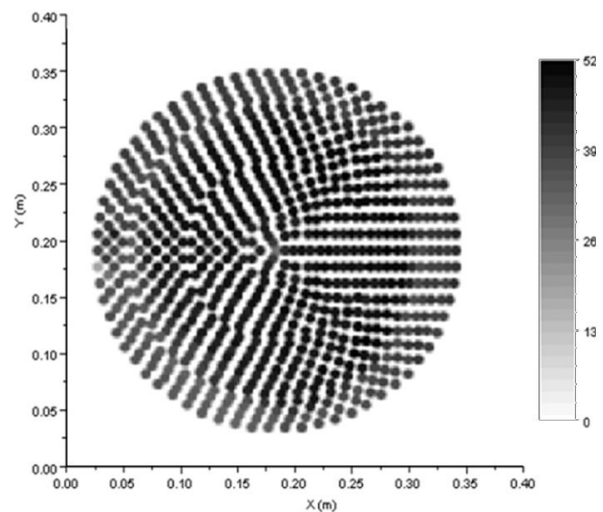


Figure 122 : Radiographie par rayons X du disque de peuplier après ré-échantillonnage en 484 points (atténuation des rayons X codée sur 6 bits, non signé).

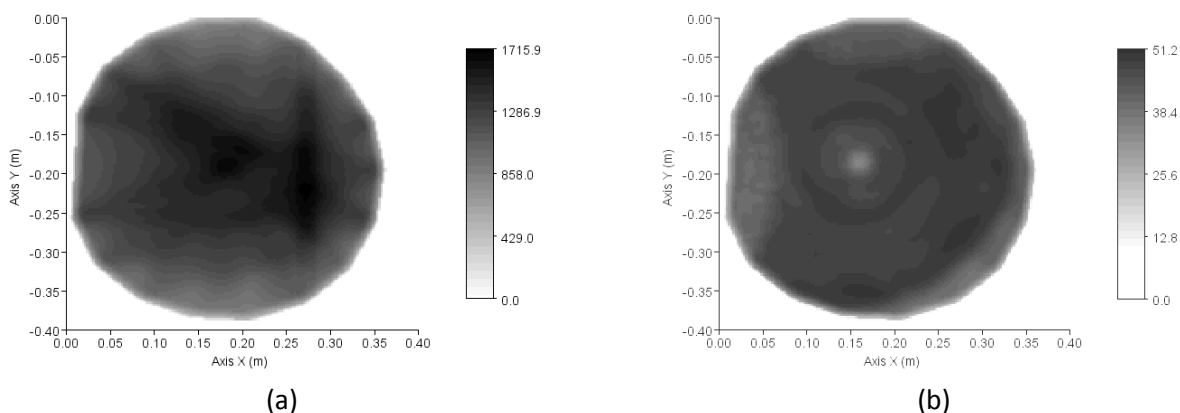


Figure 123 : Tomographie de lenteur (10^{-6} s/m) (a) et radiographie par rayons X (b) pour le peuplier.

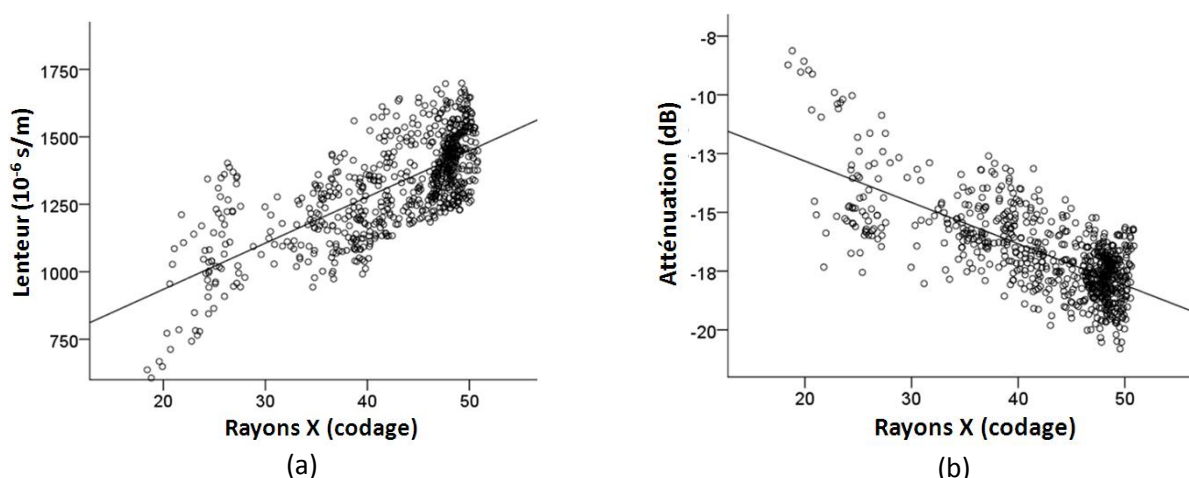


Figure 124 : Relations entre lenteur et radiographie (a), atténuation et radiographie (b) pour le peuplier.

Dans la Figure 124, les valeurs faibles de rayons X (entre 20 et 30) sont associées à la zone périphérique de faible teneur en humidité (Les teneurs en humidité ont été mesurées sur les échantillons du disque B). Pour le bois, la lenteur des ultrasons est liée à la teneur en humidité ; Lorsque la teneur en eau diminue, la lenteur diminue. Les valeurs moyennes de lenteur pour le bois de tension et le bois normal (1496.10^{-6} s/m et 1328.10^{-6} s/m, Tableau 18) sont principalement associées à des valeurs de codage de l'atténuation des rayons X allant de 40 à 50. Ces observations permettent de conclure que les relations (lenteur et atténuation) ont été « tirées » par la distribution de l'humidité dans le bois. La différence entre bois de tension et bois normal ne peut être mise en évidence dans un graphique de dispersion ultrasons/rayons X. La différence de densité entre bois de tension et bois normal n'est de plus pas systématique.

Pour l'épicéa, l'image de tomographie de lenteur et la radiographie par rayons X sont montrées à la Figure 125. La zone de couleur claire, près de la moelle est associée à une faible teneur en humidité. Les relations entre tomographie de lenteur, tomographie d'atténuation et radiographie sont présentées à la Figure 126. Ces diagrammes sont plus complexes à analyser que ceux du peuplier. Des points « aberrants » ont été trouvés et mis de côté dans un premier temps. Sans ces valeurs aberrantes, une relation

linéaire significative est trouvée pour la lenteur ($R^2 = 0.55$, $N = 399$) et pour l'atténuation ($R^2 = 0.60$, $N = 399$). Le modèle linéaire s'écrit : $\text{Lenteur} \cdot 10^6 = 28 \cdot X + 300$ (erreur standard de $158 \cdot 10^{-6}$ s/m) et $\text{Atténuation} = -0.3 \cdot X - 2$ (erreur standard de 1,6 dB).

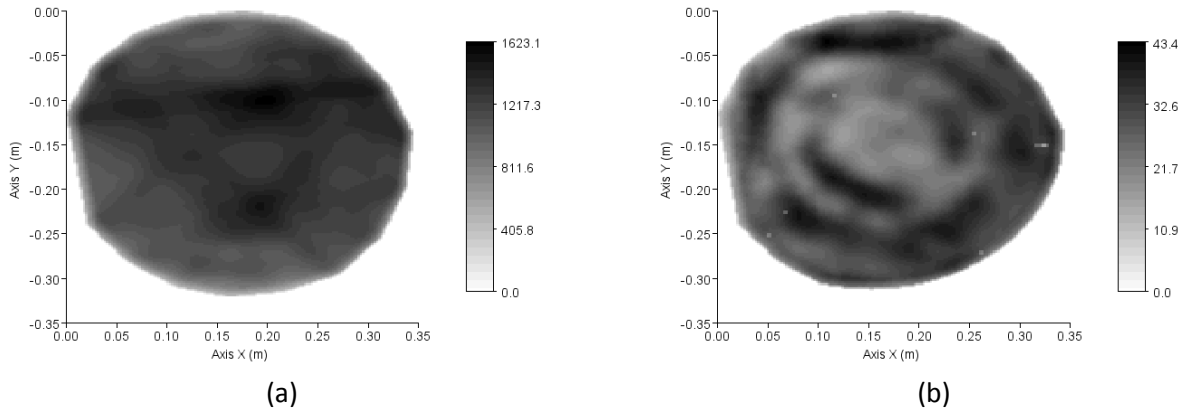


Figure 125 : Tomographie de lenteur (10^{-6} s/m) (a) et radiographie par rayons X (b) pour l'épicéa.

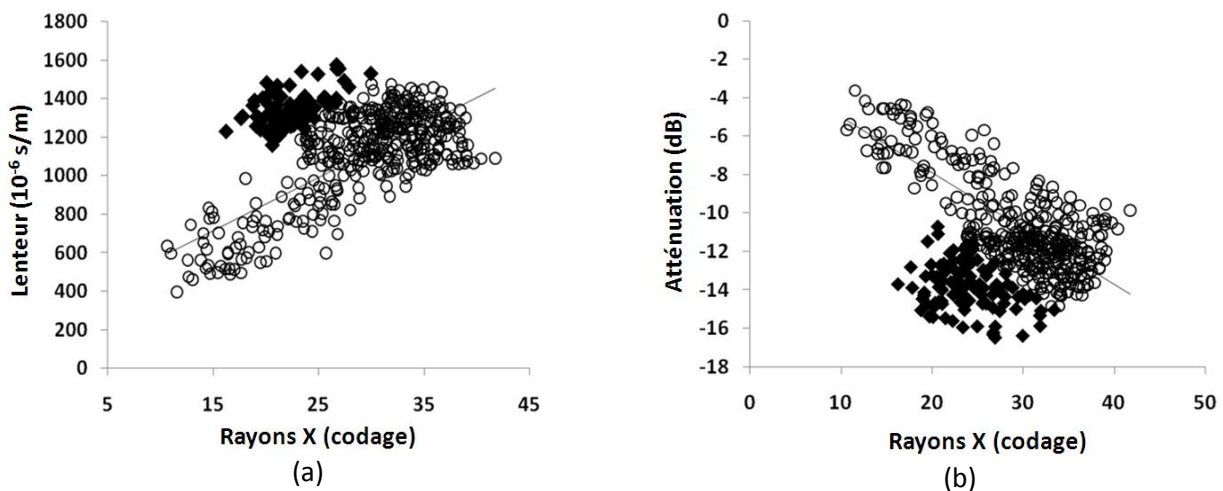


Figure 126 : Relations entre lenteur et radiographie (a), atténuation et radiographie (b) pour l'épicéa. (♦ : points « aberrants »).

Dans la Figure 126, la valeur moyenne de lenteur pour le bois de compression ($721 \cdot 10^{-6}$ s/m, Tableau 18) est associée à la valeur de radiographie de 15. Pour le bois normal, la valeur moyenne de lenteur ($1210 \cdot 10^{-6}$ s/m, Tableau 18) est associée à une valeur de radiographie de 30 à 40. Dans le cas de l'épicéa, les relations entre tomographie ultrasonore et radiographie sont dues aux différences entre bois de compression et bois normal. Les points de valeurs aberrantes sont caractérisés par une lenteur moyenne de $1347 \cdot 10^{-6}$ s/m, une atténuation moyenne égale à -13.8 dB et une valeur de radiographie comprise entre 20 et 30. La position des valeurs aberrantes dans la section transversale du disque est localisée sur la moelle et correspond à une zone de faible teneur en humidité. Une faible teneur en eau aurait dû induire une faible lenteur, mais ce n'est pas le cas. Ce phénomène est expliqué par la présence du bois juvénile associé à une variation nette de la teneur en humidité. Le bois juvénile est caractérisé par de faibles propriétés mécaniques et donc par une forte lenteur des ultrasons avec une atténuation élevée.

En outre, la résolution spatiale de la tomographie ultrasonore ne permet pas de révéler des variations brusques de propriété (faible lenteur induite par la faible teneur en eau par exemple) près de la zone de bois juvénile (caractérisée par une forte lenteur).

3.3.3.3. Effet de l'écorce et de la présence de cavité en imagerie paramétrique

Les billons testés avec Mohammad-Ali étaient écorcés et ont été sondés manuellement. Ashkan Ghodrati a pu expérimenter le tomographe automatique pendant son Master. Ses travaux ont été valorisés par un article dans un congrès international (10th Anglo-French Physical Acoustics Conference ; actes publiés en 2012 dans le J. Phys.: Conf. Ser. 353).

Un billon d'épicéa prélevé entre 0.80 m et 1.30 m de hauteur est utilisé pour cette étude. Le diamètre moyen est de 15 cm. La forme de la bille est quasi-cylindrique. L'arbre était âgé de 26 ans. L'échantillon est emballé dans des films plastiques pour minimiser l'effet du séchage naturel.

Le billon est ensuite découpé en un disque de 5 cm d'épaisseur et un disque de 15 cm d'épaisseur. Ces disques sont prélevés dans la zone médiane pour minimiser les effets du séchage naturel. Le disque de 5 cm d'épaisseur est utilisé pour déterminer la teneur en humidité moyenne et aussi le profil d'humidité le long du rayon (Figure 127).



Figure 127 : Échantillonnage pour la détermination de la teneur en humidité (dimensions des échantillons: 2 x 3 x 5 cm³).

Le disque de 15 cm d'épaisseur est testé en tomographie dans 3 états : avec écorce, écorcé et percé (2 trous de diamètre 1 cm et 2 cm, Figure 128-c). Les tests de tomographie sont réalisés avec un pas angulaire de 10° (36 points de sondage). Les essais sont entièrement automatiques sans intervention d'un opérateur. Le capteur n'est pas directement en contact avec l'échantillon, un dispositif muni d'une roulette métallique enduit de graisse assure le couplage. L'émission ultrasonore est un signal carré de 5 périodes de 480 V. La fréquence d'émission est de 55 kHz. Le signal analogique de sortie est amplifié de 80 dB. L'acquisition est réalisée par un convertisseur de résolution 16 bits et une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz. La durée d'acquisition est de 410 µs. Le signal de sortie est préalablement filtré par une ondelette de Morlet à 55 kHz avec une bande passante de 20 kHz.

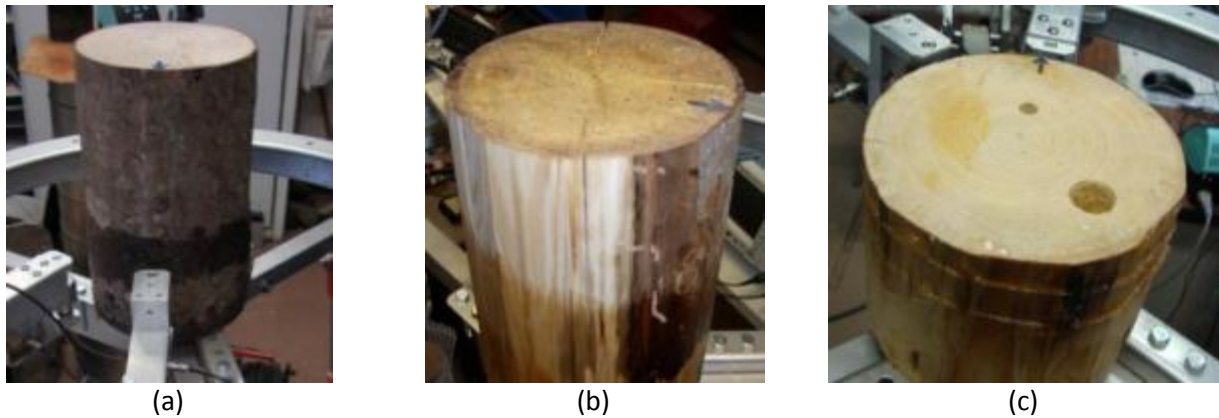


Figure 128 : Tomographie sur le billon d'épicéa, (a) avec écorce, (b) écorcé et (c) percé de 2 trous de diamètre 1 cm et 2 cm.

Les images tomographiques sont calculées en utilisant un algorithme de rétroprojection filtré (filtre de Shepp-Logan) en géométrie de type éventail avec un pas angulaire de 10° . Ce qui conduit à 900 acquisitions ; pour chaque projection, un secteur angulaire ne peut être testé en raison de l'encombrement des chariots. Une analyse complète est effectuée en 40 minutes avec l'appareil à ce stade de conception. En comparaison, les 3 opérateurs bien formés ont été invités à faire leur propre analyse avec 18 points de mesure (306 acquisitions) et la durée du processus de numérisation n'a jamais été moins d'une heure. La limite supérieure théorique du nombre de pixels calculés est de 450 (maillage de 39 mm^2). La résolution physique est de 26 mm (résolution axiale : longueur d'onde) et 31 mm (résolution latérale : équivalent de la 1^{ère} zone de Fresnel ; Figure 129).

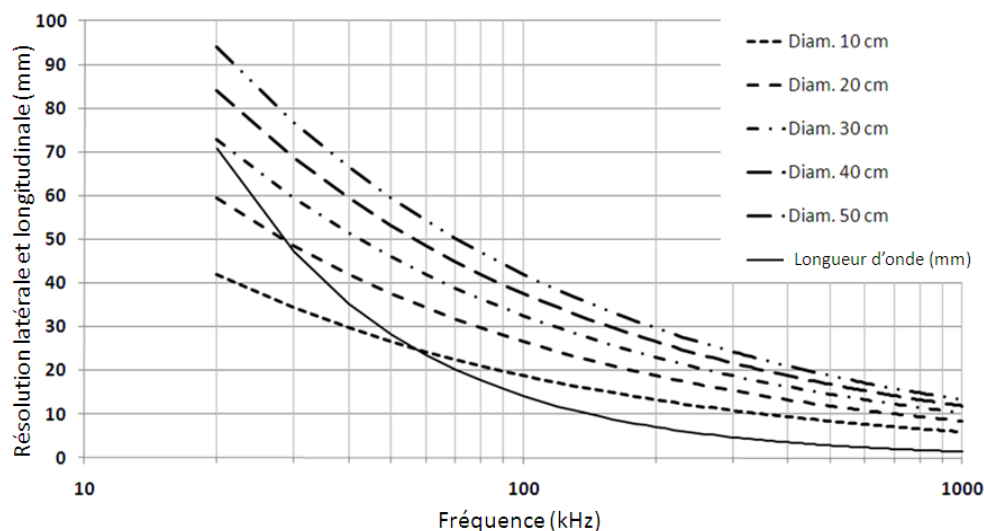


Figure 129 : Résolution latérale et longitudinale en fonction de la fréquence et fonction du diamètre d'échantillon (la vitesse de propagation est fixée à 1400 m/s).

Cette résolution conduit à un maillage de 806 mm^2 ; les images sont donc lissées par un filtre de Blackman bidimensionnel de la taille de la longueur d'onde (les erreurs induites par l'utilisation du filtre Shepp-Logan sont également réduites). Il est important de souligner que la redondance de l'information (39 mm^2 comparativement à 806 mm^2) a permis de diminuer l'effet des valeurs expérimentales erronées

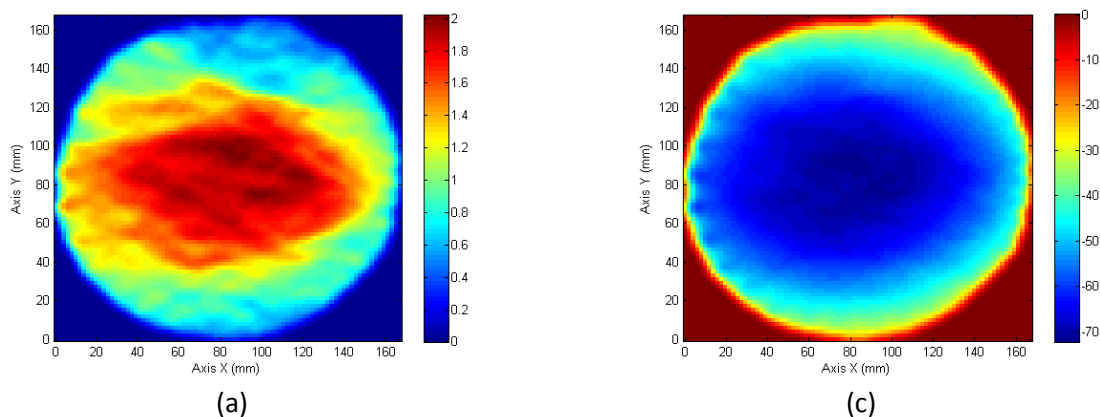
dans le processus d'imagerie. Dans ce qui suit, l'atténuation (dB/m) est normalisée par le diamètre et donc présentée en (dB).

Modalités	Student t p (bilateral)	Wilcoxon p (bilateral)
Ecorce – Sans écorce		
Vitesse	0.056	0.496
Atténuation	< 0.001	< 0.001
Perçage – Sans écorce		
Vitesse	0.030	0.126
Atténuation	0.953	0.998

Tableau 19 : Tests de Student et de Wilcoxon sur des échantillons appariés pour la vitesse et l'atténuation entre le disque avec écorce, écorcé et percés.

La comparaison des moyennes permet d'étudier l'effet de l'écorce et des perçages sur les paramètres ultrasonores. Les résultats du test t, présentés dans le Tableau 19, sont biaisés par la non-normalité des paramètres. Ce phénomène a été mis évidence en observant les distributions statistiques (distributions bimodales). Les résultats du Tableau 19 sont alors complétés par un test de Wilcoxon non paramétrique (valides lorsque l'hypothèse de normalité n'est pas satisfaite ou la taille de la population trop petite). Les tests de Wilcoxon pour l'atténuation sont en accord avec ceux de Student, mais ne confirment pas les résultats de Student pour la vitesse. L'atténuation moyenne mesurée sur le disque avec écorce est donc significativement différente de celle après écorçage. L'atténuation moyenne est plus élevée avec écorce que sans écorce (ce qui se conçoit bien). Aucune différence significative n'a été trouvée entre l'atténuation moyenne du disque écorcé et percé. En ce qui concerne les mesures de vitesse, il existe une différence entre le disque avec écorce, écorcé et percé mais les probabilités associées sont trop importantes pour être absolument affirmatif.

Les images de lenteur et d'atténuation sont présentées à la Figure 130. Il n'y a aucun effet visible de la présence de l'écorce sur les contours des images. Ce phénomène est dû à la faible épaisseur de l'écorce (3 à 5 mm) par rapport à la longueur d'onde (26 mm) ajouté à l'effet de lissage du filtre bidimensionnel.



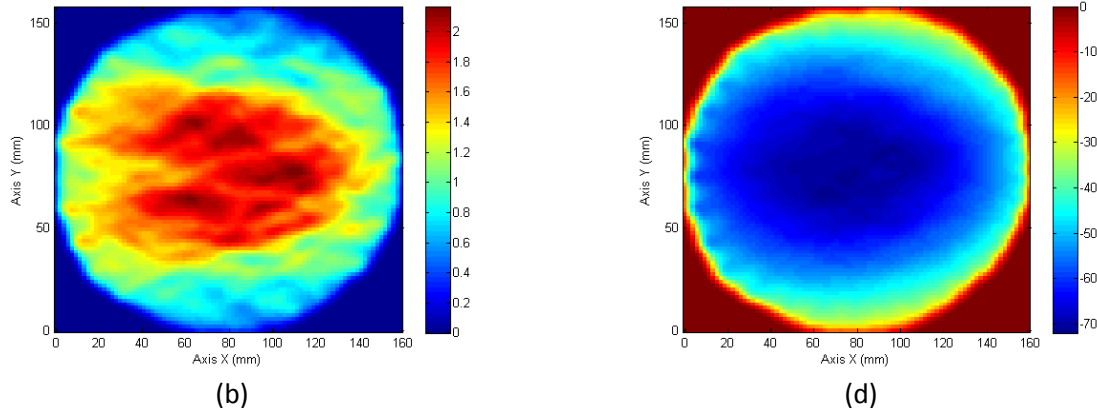


Figure 130 : Cartes tomographiques de lenteur (10^{-3} s/m) (a, b) et de l'atténuation (dB) (c, d) pour le disque du premier journal, avec de l'écorce (a, c) et écorcées (b, d).

La Figure 130 montre toutefois deux régions différentes de la moelle vers la périphérie. Ces zones ont été mises en évidence à la Figure 131 où les droites d'émission-réception ont été tracées dans le cas où la lenteur est plus faible que 1.2×10^{-3} s/m et l'atténuation est supérieure à 51 dB. L'existence de ces zones a pour effet les distributions bimodales déjà observées. La périphérie est caractérisée par une vitesse plus élevée et un amortissement plus faible que celles de la moelle.

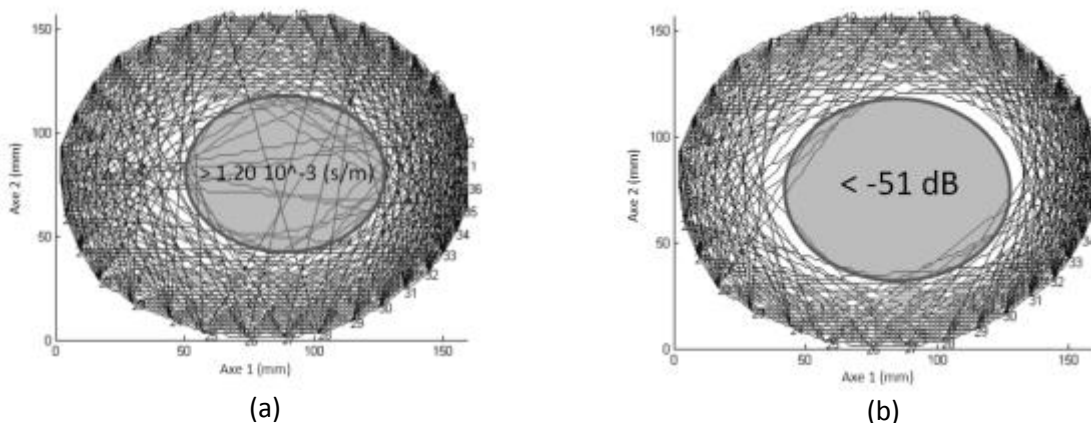


Figure 131 : Trajets d'émission-réception avec une lenteur inférieure 1.2×10^{-3} s/m (a) et d'atténuation supérieure à 51 dB (b) pour le disque avec écorce.

Le phénomène inverse a été observé par Socco (2004) et interprété comme un effet de l'anisotropie du bois : les plus courts trajets (périphérie) sont plus influencés par le comportement tangentiel de bois (forte lenteur), tandis que le comportement radial (faible lenteur) a un effet plus important pour les trajets vers le centre. Dans ce cas précis (Figure 130), le phénomène observé s'explique par le passage du bois juvénile au bois mature couplé avec l'effet de la répartition de l'humidité (Figure 132).

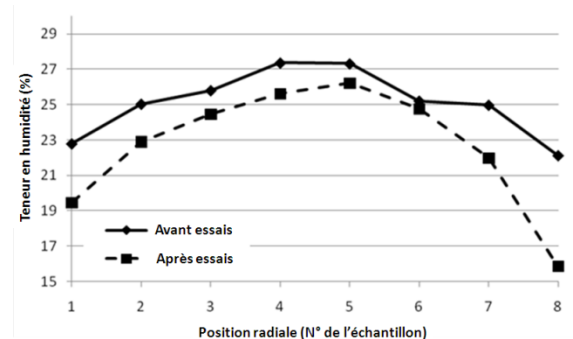


Figure 132 : Teneur en humidité (%) selon la position radiale avant et après les essais par ultrasons.

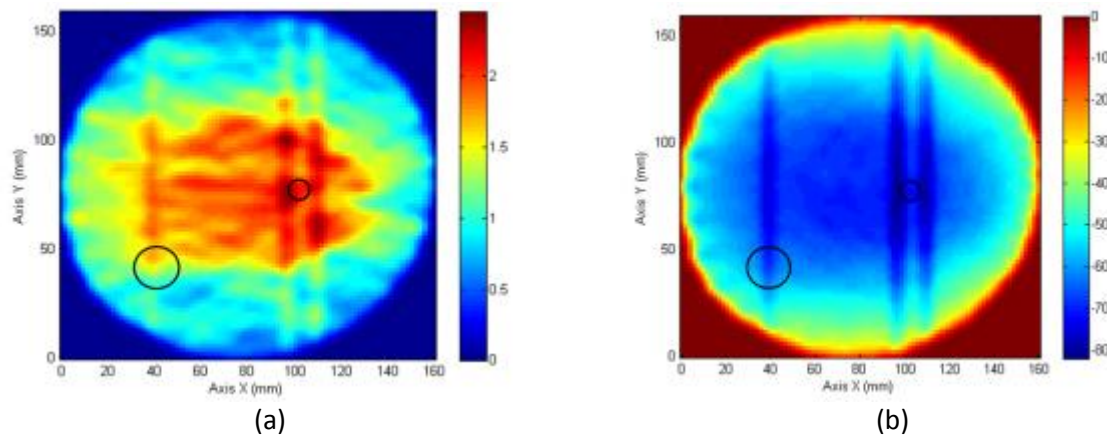


Figure 133 : Cartes tomographiques de lenteur (10^{-3} s/m) (a) et d'atténuation (dB) (b) pour le disque percé. Les cercles noirs indiquent les positions des percages.

Les images tomographiques obtenues pour le disque percé sont présentées à la Figure 133. L'effet des trous est visible par des régions avec une grande lenteur et un amortissement élevé. Cette observation est surtout valable pour le trou de diamètre (10 mm) qui est 2 fois moins grand que la longueur d'onde (26 mm). La forme associée aux trous n'est cependant pas un cercle mais une ellipse ou 2 ellipses très allongées. Plusieurs hypothèses ont été avancées : l'anisotropie n'était pas prise en compte, certaines fissures dues au séchage naturel se sont produites, la procédure de reconstruction n'est pas bien adaptée pour les données manquantes (il existe un secteur angulaire non balayé, seulement 250° est sondé pour chaque projection), le montage des sondes induit des ondes « arrières » qui modifient les signaux reçus. Le problème provenait en fait d'un artefact de calcul (le même que celui de la Figure 116 et de la Figure 117) associé à la distorsion du signal provoqué par les roulettes métalliques du dispositif. Le code de reconstruction a depuis été corrigé (Figure 134) et le système de couplage transducteur – objet a été modifié.

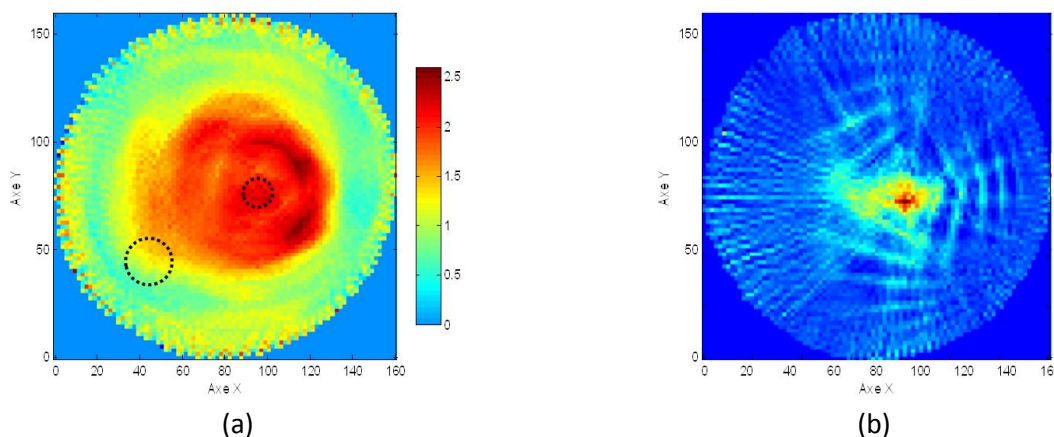


Figure 134 : Carte tomographique de lenteur (10^{-3} s/m) après correction de l'artefact de calcul (a), après traitement du signal pour révéler la présence du défaut prépondérant (b).

4. Conclusions et perspectives

La caractérisation des produits bois et composites par l'utilisation d'ondes mécaniques constitue la problématique des travaux présentés. Cette caractérisation n'est possible que par l'union de plusieurs disciplines scientifiques : la physique des ondes élastiques, la science du bois, le traitement des signaux, les mathématiques appliquées, les statistiques et les mesures physiques. D'un point de vue fondamental, il s'agit alors de comprendre l'interaction onde-matière par la résolution du problème direct : connaissant l'état de l'objet matériel et la perturbation initiale, suis-je capable de connaître la réponse dynamique de l'objet ? Puis de caractériser les propriétés matérielles ou d'identifier les éventuelles hétérogénéités par résolution du problème inverse : connaissant la perturbation initiale et la réponse dynamique de l'objet matériel, suis-je capable de connaître l'état de l'objet ?

La problématique abordée comporte de multiples facettes. Chaque problème de contrôle non destructif est en fait unique et la manière de le résoudre dépend autant de l'objet lui-même que de son contexte (industriel et/ou scientifique). Il existe également plusieurs méthodes de résolution qui n'ont parfois de commun que la physique des ondes élastiques et l'objet lui-même (de même qu'il est possible de résoudre un problème en dynamique de manière très différente). Les travaux présentés sont organisés en dissociant de manière hiérarchique : la caractérisation unidimensionnelle et l'imagerie bidimensionnelle ; les ondes acoustiques et les ondes ultrasonores ; les déterminations quantitatives et les aspects qualitatifs.

Les résultats obtenus permettent d'exposer les principaux acquis et certaines voies restant à explorer. La réponse dynamique peut être définie par son spectre en fréquence, par l'évolution de ce spectre dans le temps ou par un petit nombre de descripteurs résumant l'information vibratoire. L'utilisation de méthodes statistiques est alors nécessaire pour mettre en relation cette information et les propriétés intrinsèques recherchées. De ce point de vue, un spectre d'absorbance en spectroscopie proche infrarouge est analogue à un spectre de vibration acoustique ; les mêmes méthodes numériques peuvent être utilisées.

L'étude des propriétés de rigidité et de résistance de sciages à usage structurelle a démontré la faisabilité de l'utilisation directe du spectre en fréquence comme variable prédictive. La réponse vibratoire est riche en information sur l'état mécanique de l'objet et inclut l'influence des hétérogénéités. Vouloir résumer cette information au seul module d'élasticité dynamique est alors très réducteur. Une application industrielle de ce type de modèle est possible. Cependant, il est nécessaire de normaliser les spectres en fréquence par les caractéristiques physiques des poutres à classer. La méthode optimale de normalisation reste un enjeu de recherche. De même que l'extension de cette analyse à la caractérisation locale des pièces au défilé qui permettrait une purge des défauts (mécaniques) avant classement final.

Les relations entre propriétés dynamiques et absorbance dans le proche infrarouge ont permis de mettre en évidence l'importance de certaines bandes d'absorption. Le principe de la spectroscopie proche infrarouge repose sur l'absorption du rayonnement par la matière. Les liaisons chimiques se comportent

comme des oscillateurs, une liaison chimique particulière pouvant absorber une radiation dont la fréquence est égale à sa fréquence de vibration (de même pour les harmoniques). Pour le matériau bois, les propriétés physico-mécaniques sont liées à la constitution chimique de la matière ; il est donc possible de mettre en relation ces propriétés et le spectre d'absorbance associé. Dans le cas du module dynamique, la bande prédominante correspond à la lignine. Dans le cas du frottement interne, la bande prédominante correspond à la cellulose. Il s'agit très vraisemblablement des ponts hydrogènes (zones amorphes des microfibrilles de cellulose). Dans la zone du proche infrarouge, les absorptions ne sont pas dues aux vibrations fondamentales des molécules, mais aux vibrations harmoniques et aux vibrations de combinaisons. Le spectre d'absorption recueilli est donc complexe et les bandes d'absorption de toutes les liaisons chimiques se chevauchent. L'interprétation du spectre est de fait très délicate. Seule une utilisation appropriée des méthodes statistiques permet une interprétation (forte dépendance du prétraitement utilisé). L'enjeu scientifique se situe alors sur ces méthodes statistiques et sur l'identification des bandes d'absorbance.

Les descripteurs du signal acoustique peuvent avoir une « origine » physique (valeur de la fréquence fondamentale par exemple) ou une justification purement subjective (en psychoacoustique et en synthèse musicale) : qu'est-ce qui caractérise la « beauté » d'un son ? Un son « musical » peut être classé selon quatre caractères : la durée, la hauteur (liée à la fréquence), l'intensité et le timbre. Le timbre varie en fonction de la source sonore, et ceci, indépendamment des trois premières caractéristiques. Le lien entre les descripteurs du signal et un jugement subjectif a été étudié dans le cas simple de lames de xylophone (la qualité acoustique étant fortement dépendante de l'instrument de musique considéré et de la place de la pièce étudiée dans l'instrument). Le choix du luthier est principalement influencé par l'amortissement temporel de la fréquence fondamentale et dans une moindre mesure par l'amplitude de cette fréquence. La relation entre descripteurs et choix n'est cependant pas linéaire mais sigmoïdale. Trois groupes (bon, moyen, mauvais) ont ainsi pu être retrouvés de cette relation particulière.

Une extension de cette étude fut la caractérisation des sons de différents matériaux (bois, métal ou verre) produits par impact. L'analyse a montré que la transition entre le métal et le verre est la mieux perçue, au contraire de la transition bois-métal. La catégorie du métal possède une région très nettement délimitée. Elle est caractérisée par un modèle logistique possédant seulement deux paramètres liés au phénomène de dissipation de l'énergie vibratoire. Le verre possède le modèle le plus complexe avec 6 paramètres (la fréquence « moyenne » et « l'étalement » du spectre prédominant). La catégorie du bois est la plus étendue. Trois paramètres sont nécessaires pour discriminer cette catégorie du métal et du verre : deux paramètres liés à l'amortissement temporel et la fréquence « moyenne ». Les descripteurs utiles en psychoacoustique résument en un petit nombre de paramètres la quasi-totalité de l'information sonore (ces paramètres servent à la synthèse des sons). Ils ont alors un intérêt pour le contrôle et la caractérisation des matériaux. Cependant peu de travaux font le lien entre ces descripteurs et les propriétés intrinsèques de la matière. Il en est de même pour le lien entre modèle de synthèse sonore et modèle purement mécanique (certains modèles de synthèse sonore sont analogues aux éléments finis).

Les travaux présentés jusqu'ici analysaient la réponse dynamique (vibrations acoustiques libres) permettant une caractérisation globale de l'objet (classement mécanique ou perceptif). Une

caractérisation plus précise consiste à étudier l'objet localement selon différentes émissions (perturbations initiales). Ce type d'évaluation peut également être quantitatif (propriété mécanique) ou qualitatif (présence ou absence de défaut). Le résultat se présente sous la forme de cartographie (uni- ou bi- dimensionnelle). Dans le cas unidimensionnel, la recherche de criques de compression dans les assemblages collés a été réalisée par ultrasons. Les ondes rétrodiffusées sont analysées (contraste d'impédance acoustique) avec un transducteur mobile sous plusieurs angles d'incidence. Les observations expérimentales ont montré que la présence de crrique modifie le signal réfléchi. L'altération du signal est fonction de l'angle d'incidence. Un sondage optimal devrait donc être réalisé sous plusieurs angles d'incidence. Les expériences ont cependant été conduites dans l'eau et les résultats obtenus doivent être transposés au cas de transducteur (ou de matrice de transducteurs) air-matériau.

Les ultrasons ont également été utilisés en transmission afin d'étudier l'effet de l'anisotropie du bois sur les vitesses de propagation. La modélisation théorique du problème direct (série d'essais sur une sphère orientée) a permis de proposer une méthode de détermination des axes d'orthotropie du matériau. La solution du problème inverse (détermination des constantes de rigidité du matériau) n'a pas permis de déterminer les 9 inconnues du problème mais 6 inconnues. Cette solution apparaît comme étant plus sensible à l'incertitude sur les angles d'orientation des essais sur la sphère qu'à l'incertitude sur la détermination de la rigidité apparente. Une amélioration de la méthodologie expérimentale consisterait à générer des ondes compression puis des ondes de cisaillement afin de déterminer les 9 constantes d'élasticité de la matrice de rigidité.

Dans le cas de cartographie bidimensionnelle, la recherche de délamination a été réalisée dans le domaine acoustique au moyen de trois types d'émission. La méthode utilisant une excitation contrôlée à fréquence balayée a montré que la fréquence de résonance mesurée au centre d'une zone collée est significativement supérieure à celle mesurée au centre d'une zone non collée. Lorsque l'on déplace le point d'excitation d'une zone collée vers une zone non collée, il se produit un glissement continu de la fréquence de résonance. L'utilisation d'un impact ponctuel au marteau instrumenté a montré que la présence de délamination influe sur la forme de la courbe d'évolution force-temps lors du choc. La méthode par contact frottant est analogue dans son principe à celle utilisant un balayage en fréquence. Le frottement excite la structure dans une gamme de fréquence qui dépend de l'objet source. C'est cette gamme de fréquence qui est « balayée » lors du sondage. Dans le cas d'une structure comportant des délaminations, chaque décollement de la couche de surface est assimilable à une plaque mince qui possède ses propres modes de vibration. Les zones délaminées sont identifiables par la présence de hautes fréquences et une analyse temps-fréquence de la réponse dynamique permet la détection et le positionnement des délaminations.

Le dernier aspect présenté de la cartographie bidimensionnelle est celui de la tomographie acoustique et ultrasonore des arbres sur pied. La tomographie acoustique a été étudiée dans un premier temps. Ce type de tomographie est utilisé par les dispositifs commerciaux actuels. Seize points de sondage et un marteau instrumenté associé à un accéléromètre ont été utilisés. Les images tomographiques de la rondelle comportant un défaut artificiel ont révélé la présence d'une zone de lenteur très élevée à l'endroit du défaut. Cette zone devient de plus en plus visible au fur et à mesure que le diamètre du défaut augmente. La présence de singularités naturelles en particulier les nœuds de faibles sections sont difficilement détectables. Cependant l'effet d'un trou de petit diamètre (3 cm pour un diamètre moyen

de 48 cm) peut être observé sur une image. La détection de petites hétérogénéités est possible (de dimension bien inférieure à la longueur d'onde), mais la qualité de la reconstruction est fortement dépendante des conditions expérimentales et des algorithmes utilisés.

Les résultats de tomographie acoustique ont mis en évidence plusieurs effets conjugués conduisant à des performances en cartographie quantitative et qualitative très médiocres. Il serait d'ailleurs judicieux de comparer tous les dispositifs commerciaux actuels sur un objet académique homogène isotrope (de type PVC) et cylindrique comportant plusieurs trous de diamètre différent et positionnés de manière aléatoire dans la section (la position de la singularité a un effet sur l'image reconstruite). Les problèmes mis en évidence sont les suivants : le faible nombre de sonde (en rétroprojection classique, l'image commence à devenir « nette » à partir de 100 points de sondage pour un objet numérique analogue à la section radiographiée d'un arbre) donc une nécessité de reconstruire l'information manquante ; l'imprécision de détermination de la vitesse de propagation (la fréquence utilisée est en fait la fréquence fondamentale de vibration acoustique du tronc dans sa section, soit environ 2 kHz pour un diamètre de 40 cm ce qui implique une longueur d'onde d'environ 80 cm) ; le problème de distorsion due à l'anisotropie transverse du matériau (les algorithmes d'inversion classiques supposent un matériau isotrope).

La nécessité d'améliorer la qualité des images obtenues (diminuer la résolution spatiale) a conduit à l'étude de la tomographie ultrasonore dans un second temps. Les expériences ont d'abord été réalisées dans des conditions idéales avec la méthode la plus précise possible : tomographie de réflexion dans l'eau à une fréquence de 500 kHz. La tomographie en réflexion permet d'obtenir des images qualitatives à partir de mesures rétro – diffusées analogues à l'échographie en médecine (il ne s'agit donc pas de calculer des vitesses de propagation mais de positionner les interfaces internes). L'image ainsi obtenue est géométriquement juste en se référant aux « inclusions » (écorce et défaut central). La résolution spatiale calculée à partir de l'image reconstruite est d'environ 20 mm pour un diamètre du billon de 125 mm (théoriquement, la résolution augmente avec le diamètre et augmente lorsque le nombre de sonde diminue).

La tomographie ultrasonore a ensuite été expérimentée dans des conditions plus proches de celles du terrain (un prototype automatique fut développé). Le diamètre des arbres augmentant, la fréquence d'émission fut progressivement abaissée à 55 kHz (pour des diamètres inférieurs à 50 cm, la résolution n'excède pas 60 mm). L'imagerie quantitative fut choisie car elle fournissait également des informations sur l'état mécanique du billon sondé (cartographies de lenteur et d'atténuation). L'étude de l'effet du bois de réaction sur la propagation des ondes ultrasonores a été réalisée. Des différences significatives sont observées pour la lenteur et l'atténuation dans le plan radial-tangentiel. Le peuplier et l'épicéa ont des comportements opposés. Pour le peuplier, la lenteur est plus élevée dans le bois de tension. L'atténuation est constante entre bois de tension et bois normal. Pour l'épicéa, la lenteur est plus faible dans le bois de compression ; l'atténuation suit une tendance inverse. Les images obtenues par tomographie ultrasonore ont également été comparées aux radiographies par rayons X. La forme de la dispersion ultrasons - rayons X est due aux différences entre bois de compression et bois normal. A l'inverse, la différence entre bois de tension et bois normal n'est pas observable. Au cours de cette expérimentation, la détermination précise des zones de bois de réaction a été délicate (où commence une hétérogénéité naturelle ?), les billons étaient de plus écorcés afin de limiter l'atténuation et la dispersion des ondes ultrasonores.

L'effet de l'écorce et de la présence de cavité artificielle en imagerie paramétrique a donc été étudié. L'atténuation moyenne mesurée sur le disque avec écorce est significativement plus élevée de celle après écorçage. Aucune différence n'a été trouvée entre l'atténuation du disque écorcé et percé. Il existe une différence entre la vitesse moyenne du disque avec écorce, écorcé et percé mais les probabilités associées sont trop importantes pour être absolument affirmatif. L'effet des deux trous est visible sur les images tomographiques par des zones de grande lenteur et d'amortissement élevé. Cette observation est valable pour un trou de diamètre (10 mm) qui est trois fois moins grand que la résolution (31 mm).

Les principaux obstacles à l'amélioration de la qualité des images tomographiques sont toujours présents même si les travaux présentés ont permis de progresser :

- Faible nombre de sonde – L'utilisation d'un dispositif automatique permet un très grand nombre de mesures. L'information manquante est de plus reconstruite par méthode numérique.
- Emission à basse fréquence – L'utilisation d'une émission contrôlée d'ondes ultrasonores associée à un traitement du signal adapté permet de mieux définir ce qu'est un temps de propagation et une atténuation.
- Anisotropie transverse du matériau – La modification du front d'onde due à l'anisotropie a pu être modélisée et l'effet de l'anisotropie a été vérifié expérimentalement. Des pistes existent pour la résolution du problème inverse mais ces méthodes n'ont pas encore été éprouvées.

5. Références bibliographiques

- Akitsu H., Norimoto M., Morooka T., Rowell R.M. (1993) "Effect of humidity on vibrational properties of chemically modified wood". *Wood and fiber Science*, 25(3):250-260.
- Aramaki A., Baillères H., Brancheriau L., Kronland R., Ystad S. (2007) "Sound quality assessment of wood for xylophone bars". *Journal of the Acoustical Society of America*, 121(4):2407–2420.
- Beall F. C. (2002) "Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties". *Wood Science and Technology*, 36(3):197-212.
- Becker H., Noack D. (1968) "Studies on the dynamic torsional viscoelasticity of wood". *Wood Science and Technology*, 2:213–230.
- Bernoulli D. (1748) "Réflexion et Eclaircissement sur les Nouvelles Vibrations des Cordes Exposées dans les Mémoires de l'Académie". Royal Academy of Berlin. p. 1750.
- Berthelot J.M. (2005) "Matériaux composites - Comportement mécanique et analyse des structures". Hermès – Lavoisier (Ed.), 660 p.
- Blauert J., Xiang N. (2009) "Acoustics for Engineers", Springer (Ed.), 264 p.
- Bloch I. (2010) "Reconstruction d'images de tomographie". École Nationale Supérieure des Télécommunications, département Traitement du Signal et des Images. 29 p.
- Bodig J., Goodman J.R. (1973) "Prediction of elastic parameters for wood". *Wood Science*, 5(4):249-264.
- Bodig J., Jayne B.A. (1982) "Mechanics of Wood and Wood Composites". Van Nostrand reinhold Co. (Ed.), 712 p.
- Bonneuil C., Kleiche M. (1993) "Du jardin d'essais colonial à la station expérimentale 1880-1930 : éléments pour une histoire du Cirad". Cirad (Ed.), Coll. Autrefois l'agronomie, 107 p.
- Bordonné P.A. (1989) "Module Dynamique et Frottement Intérieur dans le Bois, Mesures sur Poutres Flottantes en Vibrations Naturelles". Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine. 109 p.
- Brancheriau L. (1997) "Etude des relations entre les caractéristiques mécaniques obtenues en flexion trois et quatre points". DEA - Sciences du Bois, Université de bordeaux I. 64 p.
- Brancheriau L., Baillères H. (2002a) "Natural vibration analysis of wooden beams: a theoretical review". *Wood Science and Technology*, 36(4):347-365.
- Brancheriau L. (2002b) "Expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique". Thèse de l'Université de la Méditerranée – Aix Marseille II, Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille, 267 p.

- Brancheriau L. (2006) "Influence of cross section dimensions on the Timoshenko's shear factor – Application to wooden beams in free-free flexural vibration". *Annals of Forest Science*, 63(3):319-321.
- Brancheriau L., Kouchade C., Brémaud I. (2010) "Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods", *Journal of Wood Science*, 56(5):371–379.
- Brancheriau L. (2011) " Corrections for Poisson Effect in Longitudinal Vibrations and Shearing Deformations in Transverse Vibrations Applied to a Prismatic Orthotropic Body" in "Mechanical Vibrations: Types, Testing and Analysis", Nova Science Publishers (Ed.), 205-223.
- Brémaud I. (2006) "Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique". Thèse de l'Université Montpellier II, 294 p.
- Brémaud I., Gril J., Thibaut B. (2011). "Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data". *Wood Science and Technology*, 45(4):735-754.
- Bruneau M., Potel C. (2006) "Matériaux et acoustique 1 : propagation des ondes acoustiques", Lavoisier (Ed.), 336p.
- Bucur V., Feeney F. (1992) "Attenuation of ultrasound in solid wood". *Ultrasonics*, 30:76-81.
- Bucur V (2003) "Nondestructive Characterization and Imaging of Wood", Springer (Ed.), 324p.
- Bucur V. (2006) "Acoustics of Wood". Springer Verlag (Ed.) second edition, 393 p.
- Bulleit W.M., Falk R.H. (1985) "Modeling stress wave passage times in wood utility poles". *Wood Science and Technology*, 19:183-191.
- Caldersmith G., Freeman E. (1990) "Wood properties from sample plate measurements, part I". *Catgut Acoustical Society Journal*, 1(5):8–12.
- Catinot R. (1994) "Le Centre technique forestier tropical, 1916-1984". Cirad (Ed.), Coll. Autrefois l'agronomie, 175 p.
- Chaigne A. (2001) "Ondes acoustiques". Editions de l'Ecole polytechnique (Ed.), 218 p.
- Chan J.M., Walker J.C., Raymond C.A. (2011) " Effects of moisture content and temperature on acoustic velocity and dynamic MOE of radiate pine sapwood boards". *Wood Science and Technology*, 45:609-626.
- CNDB (2006) "Construire en bois, un choix durable". Comité National pour le Développement du Bois, p. 20.
- Dikrallah A., Hakam A., Kabouchi B., Brancheriau L., Baillères H., Famiri A. and Ziani M. (2006) "Experimental analysis of acoustic anisotropy of green wood by using guided waves". *Proceedings of the ESWM-COST Action E35*, Florence, Italy, pp. 149-154.
- Dirol D., Déglise X. (2001) "Durabilité des bois". Hermès (Ed.), 416 p.

- Divos F. (2000) "Stress wave based tomography for tree evaluation". 12th Int. Symposium on NDT of Wood, Sopron: 469.
- Drénou C. (2001) "Vitalité et solidité de l'arbre : choisir les méthodes de diagnostic". Collection : Les cahiers d'arbre actuel, Institut pour le Développement Forestier, 64 p.
- Dunlop J.I. (1983) "Testing of poles by acoustic resonance". Wood Science and Technology, 17:31-38.
- FAO (2005) "Evaluation des ressources forestières mondiales 2005". Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 320 p.
- FAO (2007) "Situation des forêts du monde 2007". Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 143 p.
- Gerhards C.C. (1982) "Longitudinal stress waves for lumber stress grading: factors affecting application: state of the art". Forest Product Journal, 32(2):20-25.
- Gilbert E., Smiley E. (2004) "Picus sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus alba*) and hickory (*Carya* spp.)". Journal of Arboriculture, 30:277-281.
- Glos P. (1983) "Technical and economical possibilities of timber strength grading in small and medium sized companies". SAH-Bulletin.
- Graff K.F. (1975) "Wave motion in elastic solids". Ohio State University Press (Ed.), 667 p.
- Grangeat P. (2002) "La tomographie : fondements mathématiques, imagerie microscopique et imagerie industrielle", Lavoisier (Ed.), 286 p.
- Guitard D. (1987) "Mécanique du matériau bois et composites". Cepadues (Ed.), 238 p.
- Haines D. (1979) "On musical instrument wood". Catgut Acoustal Society Newsletter, 1(31):23-32.
- Haines D.W., Leban J.M., Herbe C. (1996) "Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods". Wood Science and Technology, 30:253-263.
- Halabe U., Bidigalu G., GangaRao H., Ross R.J. (1997) "Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques". Materials evaluation, 55(9):1013-1018.
- Hearmon R.F.S. (1966) "Vibration testing of wood". Forest Product Journal, 16(8):29-40.
- Hellier CJ (2001) "Handbook of Nondestructive Evaluation". McGraw-Hill (Ed.), 603 p.
- Holz D. (1967) "Untersuchungen an Resonanzholz. III. Mitteilung: über die gleichzeitige Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls und der Dämpfung an Holzsteben im hörbaren Frequenzbereich". Holztechnologie, 8(4):221-224.
- Holz D. (1996) "Tropical hardwoods used in musical instruments - can we substitute them by temperate zone species ?". Holzforschung, 50 (2):121-129.

- Ilic J. (2001) "Relationships among the dynamic and static elastic properties of air-dry *Eucalyptus delegatensis* R.Baker". *Holz als Roh- und Werkstoff*, 59, 169–175.
- Jiang J., Lu J., Yan H. (2008). "Dynamic viscoelastic properties of wood treated by three drying methods measured at high-temperature range". *Wood and Fiber Science*, 40(1):72-79.
- Kak A.C., Slaney M. (1988) "Principles of computerized tomographic imaging". IEEE Press (Ed.), 329 p.
- Kim G.H., Barnes H.M., Lyon D.E. (1994) "Effect of decay on the mechanical properties of full-sized lumber". *Holzforschung*, 48:145-149.
- Kim H.G., Moreau N., Sikora T. (2005) "MPEG-7 Audio and Beyond: Audio Content Indexing and Retrieval". Wiley (Ed.), 304 p.
- Kim H.G., Moreau N., Sikora T. (2006) "MPEG-7 Audio and Beyond". John Wiley & Sons Ltd (Ed.), 285 p.
- Kollmann F., Krech H. (1960) "Dynamic measurement of the elastic wood properties and damping. A contribution to nondestructive material testing". *Holz als Roh- und Werkstoff*, 18(2):41–54.
- Kollmann F.F.P., Côté W.A. (1968) "Principles of wood science and technology – Part I: Solid wood". Springer (Ed.), 592 p.
- Kolsky H. (1953) "Stress waves in solids". Oxford University Press (Ed.), 211 p.
- Krautkraemer J., Krautkraemer H. (1990) "Ultrasonic testing of materials". Springer (4 Ed.), 667 p.
- Lefebvre J.P., Lasaygue P., Potel C., DeBellevall J.F., Gatignol P. (2004) "L'acoustique ultrasonore et ses applications". *Acoustique & techniques*, 36:4-19.
- Li L., Wang X., Wang L., Allison R.B. (2012) "Acoustic tomography in relation to 2D ultrasonic velocity and hardness mappings". *Wood Science and Technology*, 46:551-561.
- Machek L., Edlund M.L., Sierra-Alvarez R., Militz H. (2004) "A non-destructive approach for assessing decay in preservative treated wood". *Wood Science and Technology*, 37(5):411-417.
- Martinis R., Socco L.V., Sambuelli L., Nicolotti G., Schmitt O., Bucur V. (2004) "Tomographie ultrasonore pour les arbres sur pied". *Annals of Forest Science*, 61:157-162.
- Maurer H.R., Schubert S.I., Baechle F., Clauss S., Gsell D., Dual J., Niemz P. (2005) "Application of nonlinear acoustic tomography for non-destructive testing of trees". *Proceedings of the 14th international symposium on non-destructive testing of wood*, Hannover, Germany, pp. 339–349.
- Maurer H., Schubert S., Bächle F., Clauss S., Gsell D., Dual J., Niemz P. (2006) "A simple anisotropy correction procedure for acoustic wood tomography". *Holzforschung*, 60(5):567-573.
- McIntyre M.E., Woodhouse J. (1988) "On measuring the elastic and damping constants of orthotropic sheet materials". *Acta Metallurgica*, 36(6):1397–1416.
- M'hirit O., (2006) "Le Cèdre de l'Atlas : Mémoire du temps". Mardaga (Ed.), 291 p.

- Mishiro A. (1996) "Effects of grain and ring angles on ultrasonic velocity in wood". *Mokuzai Gakkaishi*, 42:211-215.
- Molin N.E., Janson E.V. (1989) "Transient wave propagation in wooden plates for musical instruments". *Journal of the Acoustical Society of America*, 85:2179–2184.
- Morze Z., Olszewski J., Paprzycki O. (1979) "Investigations of elements of the dynamical shear modulus of wood". *Holztechnologie*, 20(3):179–183.
- Nakao T., Okano T., Asano I. (1985) "Measurement of orthotropic shear modulus for wood at a high torsional vibration mode". *Mokuzai Gakkaishi*, 31(6):435-439.
- Nakao T., Okano T., Asano I. (1985) "Vibrational properties of a wooden plate". *Mokuzai Gakkaishi*, 31(10):793–800.
- Navi P., Heger F. (2005) "Comportement thermo-hydrromécanique du bois". Presses polytechniques et universitaires romandes (Ed.), 298 p.
- Nicolotti G., Socco L.V., Martinis R., Godio A., Sambuelli L. (2003) "Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees". *Journal of Arboriculture*, 29(2):66-78.
- Nilson F., Pellicane P. (1993) "Three-Dimensional Model for Wood-Pole Strength Predictions". *Journal of Structural Engineering*, 19:2199-2214.
- Norimoto M., Tanaka F., Ohogama T., Ikimune R. (1986) "Specific dynamic Young's modulus and internal friction of wood in longitudinal direction". *Wood Research and Technical Notes*, 2:53–63.
- Ohlsson S., Perstorper M. (1992) "Elastic wood properties from dynamic tests and computer modeling". *Journal of Structural Engineering*. 118:2667-2690.
- Ole Døssing (1988) "Structural testing". Brüel & Kjær (Ed.), 2 parties.
- Olszewski J., Struk K. (1983) "Effect of moisture on the orientation of dynamic shear moduli of a particleboard". *Holztechnologie*, 24(3):165–168.
- Ono T., Norimoto M. (1985) "Anisotropy of dynamic yong's modulus and internal friction in wood". *Japanese Journal of Applied Physics*, 24:960–964.
- Ouis D. (1999) "Vibrational and acoustical experiments on logs of spruce". *Wood Science and Technology*, 33:151-184.
- Peabody A.B., Wekeser J.W. (1994) "Buckling Strength of Wood Power Poles Using Finite Elements". *Journal of Structural Engineering*. 120:1893-1908.
- Pellerin R.F., Ross R.J. (2002) "Nondestructive Evaluation of Wood", Forest Products Society (Ed.), 210 p.
- Pellerin R.F., DeGroot R.C., Esenther G.R. (1985) "Nondestructive stress wave measurements of decay and termite attack in experimental wood units". 5th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, pp. 319-353.

- Perdijon J., (1993) "Le contrôle non destructif par ultrasons". Traité des Nouvelles Technologies, Série Mécanique, Hermes (Ed.), 169 p.
- Perstorper M. (1993) "Dynamic modal tests of timber evaluation according to the Euler and Timoshenko theories". 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, pp. 45-54.
- Plusquellec J. (1991) "Vibrations". Techniques de l'Ingénieur, A410, 73 p.
- Rabe C., Ferner D., Fink S., Schwarze F.W.M.R. (2004) "Detection of decay in trees with stress waves and interpretation of acoustic picus images". Arboricultural Journal, 28:3–19.
- Rinn F. (2003) "Technische Grundlagen der Impuls-Tomographie". Baumzeitung, 8:29–31.
- Rinn F. (2004) "Holzanatomische Grundlagen der Schall-Tomographie an Baumen". Neue Landschaft, 7:44–47.
- Rivière A., Martinez-Vega J.J. (2000) "Mesure de frottement interne". Techniques de l'ingénieur, P1310, 8 p.
- Ross J.R., Pellerin R.F. (1988) "NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves". Forest Product Journal, 38(5):39-45.
- Ross R.J., Pellerin R. F., Volny N., Salsig W.W., Falk R.H. (1999) "Inspection of timber bridges using stress wave timing nondestructive evaluation tools. A guide for use and interpretation". Technical Report. U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory. 15 p.
- Royer D., Dieulesaint E. (2001) "Acoustique - Propagation dans un solide". Techniques de l'Ingénieur, AF3814, 16p.
- RTS (2001) "Environmental Reporting for Building Materials 1998-2001". RTS Building Information Foundation.
- Rust S. (2000) "A new tomographic device for the non – destructive testing of trees". 12th Int. Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Sopron: 233-237.
- Rust S., Göcke L. (2000) "PICUS Sonic Tomograph – a new device for nondestructive timber testing". Int. Symposium on Plant Health in Urban Horticulture, Braunschweig, Germany: 300.
- Sakai H., Minamisawa A., Takagi K. (1990) "Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods". Ultrasonics, 28:382–385.
- Saporta G. (2006) "Probabilités, analyse des données et statistique". Editions Technip (Ed.), 622 p.
- Sapriel J. (1994) "Ultrasons". Techniques de l'Ingénieur, E1910, 29 p.
- Schubert S. (2007) "Acousto-ultrasound assessment of inner wood decay in standing trees: possibilities and limitations". PhD Thesis, Diss ETH Nr. 17126, Zürich, 124 p.
- Schubert S., Gsell D., Dual J., Motavalli M., Niemz P. (2009) "Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity". Holzforschung, 63(1):107-112.

- Schwanninger M., Rodrigues J.C., Fackler K. (2011) "A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components". *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 19(5):287-308.
- Schwarze F., Fink S. (1994) "Ermittlung der Holzzersetzung am lebenden Baum". *Neue Landschaft*, 3:182-193.
- Schwarze F. (1995) "Entwicklung und biomechanische Auswirkungen von holzzersetzenden Pilzen in lebenden Bäumen und in vitro". *Svk-Verlag*.
- Schwarze F.W.M.R., (2008) "Diagnosis and Prognosis of the Development of Wood Decay in Urban Trees". *Rowville, Enspeg*, 336 p.
- Shull PJ (2002) "Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, Applications". *Marcel Dekker (Ed.)*, 848 p.
- Sobue N. (1986) "Measurement of Young's modulus by the transient longitudinal vibration of wooden beams using a FFT spectrum analyser". *Mokuzai Gakkaishi*, 32(9):744-747.
- Sobue N., Kitazumi M. (1991) "Identification of power spectrum peaks of vibrating completely free wood plates and moduli of elasticity measurement". *Mokuzai Gakkaishi*, 37:9-15.
- Sobue N., Ikeda K. (1999) "Torsional vibration test of sugi boxed heart squared sawn timber". *Mokuzai Gakkaishi*, 45(4):289-296.
- Socco L.V., Sambuelli L., Martinis R., Comino E., Nicolotti G. (2004) "Feasibility of ultrasonic tomography for nondestructive testing of decay on living trees". *Research in Nondestructive Evaluation*, 15:31-54.
- Stevanovic T., Perrin D. (2009) "Chimie du bois". *Presses polytechniques et universitaires romandes (Ed.)*, 241 p.
- Suzuki M. (1980) "Relationship between specific gravity and decrement of dynamic Young's modulus with water". *Mokuzai Gakkaishi*, 26(5):299-304.
- Suzuki H., Sasaki E. (1990) "Effect of grain angle on the ultrasonic velocity of wood". *Mokuzai Gakkaishi*, 36:103-107.
- Thiery C. (2002) "Tomographie à rayons X". *Techniques de l'ingénieur*, P950, 24 p.
- Timoshenko S. (1921) "On the Correction for Shear of the Differential Equation for Transverse Vibrations of Prismatic Bars". *Philosophical Magazine and Journal of Science*. XLI - Sixth Series: 744-746.
- Tominaga H., Sadoh T. (1990) "Torsional vibration of wood treated with polyethylene glycol". *Mokuzai Gakkaishi*, 36(4):264-268.
- Tonosaki M., Okano T. (1985) "Evaluation of acoustical properties of wood by plate vibration tests". *Mokuzai Gakkaishi*, 31:627-632.
- Trouy-Triboulot M.C., Triboulot P. (2001) "Matériau bois - Structure et caractéristiques". *Techniques de l'ingénieur (Ed.)*, C 925, 26 p.

- Tucker B.J., Bender D.A., Pollock D.G., Wolcott M.P. (2003) "Ultrasonic plate wave evaluation of natural fiber composite panels". *Wood and Fiber Science*, 35(2):266-281.
- Vinje V., Iversen E., Gjøystdal H., (1993) "Traveltime and amplitude estimation using wavefront construction". *Geophysics*, 58(8):1157–1166.
- Wang X., Divos F., Pilon C., Brashaw B., Ross R., Pellerin R. (2004) "Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools: a guide for use and interpretation". U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 12 p.
- Wang X., Allison R.B., Wang L., Ross R.J. (2007) "Acoustic tomography for decay detection in red oak trees". U.S. Dept. of Agriculture, Forest Products Laboratory, 7 p.
- Wanin M. (2001) "Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 1)", *Techniques de l'Ingénieur*, M4130, 26 p.

